

**Aus dem Medizinischen Zentrum für ZMK-Heilkunde –
Abteilung für Zahnerhaltungskunde
des Fachbereichs Medizin
der
Philipps-Universität Marburg
Direktor: Prof. Dr. R. Frankenberger**

**Dichtigkeit von koronalen Restaurationen
nach endodontischer Therapie –
eine *In-vitro*-Langzeitanalyse über 365 Tage im
Bakterienpenetrationsmodell**

Inaugural–Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades der Zahnmedizin
dem Fachbereich Medizin
der
Philipps-Universität Marburg

vorgelegt von
Florian Eisenhut
aus
Nürnberg

Marburg, 2014

Angenommen vom Fachbereich Medizin der Philipps-Universität Marburg am
16. Juni 2014

Gedruckt mit Genehmigung der
Medizinischen Fakultät der Philipps-Universität
Marburg



Dekan:

Herr Prof. Dr. H. Schäfer

Referent:

Herr Prof. Dr. R. Frankenberger

1. Korreferentin:

Frau Prof. Dr. N. Arweiler

Meiner Familie gewidmet.

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	1
2	Summary	3
3	Einleitung	5
4	Literaturübersicht	6
4.1	Ziele der Wurzelkanalbehandlung	6
4.2	Die Wurzelkanalbehandlung	7
4.3	Untersuchung der Abdichtungseffizienz endodontischer Obturationen	12
4.4	Materialbedingte Ursachen der Mikroleakage	15
4.5	Die Problematik der Mikroleakage bei koronal nicht verschlossenen Zähnen nach endodontischer Behandlung	15
4.6	Intrakoronales Sealing der Kanaleingänge und adäquate koronale Restauration zur Vorbeugung einer Mikroleakage	18
4.7	Nicht-adhäsive Materialien für den koronalen Verschluss	19
4.8	Adhäsive Materialien für den koronalen Verschluss	21
4.9	Einflussfaktoren für die Qualität des Systems Wurzelkanalfüllung und koronaler Verschluss	26
5	Problemstellung	31
6	Material und Methoden	32
6.1	Übersicht und Arbeitsschritte	32
6.2	Die Herstellung der einzelnen Testexemplare	33
6.3	Auswahl und Herstellung der Bakterienkultur	40
6.4	Versuchsaufbau	41
6.5	Sterilisation der Probenkammern	43
6.6	Durchführung des Bakterienpenetrationstests	43
6.7	Statistische Auswertung	43
7	Ergebnisse	45

8	Diskussion	48
8.1	Diskussion der Methodik	48
8.2	Diskussion der Ergebnisse	55
9	Schlussfolgerung	58
10	Literaturverzeichnis	59
11	Anhang	74
	Abkürzungsverzeichnis	74
	Abbildungsverzeichnis	75
	Tabellenverzeichnis	76
	Verwendete Geräte und Materialien	77
	Verzeichnis der akademischen Lehrer	81
	Danksagung	82

1 Zusammenfassung

1.1 Hintergrund und Ziele

Ein dauerhafter bakteriendichter Verschluss der Wurzelkanaleingänge und die damit einhergehende Versiegelung des Pulpakammerbodens nach vorangegangener Obturation des Wurzelkanals sind die Ziele der endodontischen Therapie.

Im Laufe der letzten Jahre traten auf dem Gebiet der koronalen Restauration die adhäsiven Kompositmaterialien immer mehr in den Vordergrund. Allerdings gibt es in diesem Themenbereich noch immer viele ungeklärte Fragestellungen hinsichtlich ihrer Effizienz. In der vorliegenden Arbeit sollte im Rahmen einer Langzeitanalyse über 365 Tage die Dichtigkeit von koronalen Restaurationen nach erfolgter Wurzelkanalfüllung in einem Bakterienpenetrationsmodell *in vitro* untersucht werden.

1.2 Material und Methode

40 extrahierte, menschliche Zähne wurden trepaniert und standardisiert mittels *FlexMaster*-Instrumenten auf Größe 40 taper .04 aufbereitet. Nach abschließender Spülung mit Natriumhypochlorit (5%), Zitronensäure (40%) und Alkohol (70%) sowie der Trocknung mittels Papierspitzen wurden die Wurzelkanäle mit Guttaperchaspitzen und *AH Plus* als Sealer lateral kompaktiert.

Nach Reinigung der Zugangskavität mit Schaumstoffpellet und Ätzung der Kavität mit Phosphorsäure (37%) erfolgte der koronale Verschluss mit folgenden Restaurationsmaterialien im Bereich der Kanaleingänge und des Pulpakammerbodens in einheitlicher Schichtstärke (2 mm): Gruppe 1: *Tetric Flow* + *Syntac Classic*; Gruppe 2: *Grandio Flow* + *Syntac Classic*; Gruppe 3: *Clearfil Flow* + *Syntac Classic*; Gruppe 4: *Tetric Flow* + *Clearfil SE Bond*.

Nachfolgend wurden alle Probenzähne in ein Zwei-Kammer-System eingebaut und gamma-sterilisiert. Die Inkubation der oberen Kammer erfolgte mit einer standardisierten Menge der Bakteriensuspension (*Lactobacillus paracasei* ATCC 11578) von 5 ml pro Gefäß, während die untere Kammer mit sterilem Nährmedium (*Schaedler-Bouillon*) versehen wurde. Die unteren Probenkammern wurden täglich auf Trübung hin kontrolliert und die Befunde protokolliert. Alle 5 Tage wurde die Bakteriensuspension der oberen Bakterienkammer erneuert.

1.3 Ergebnisse

Folgende durchschnittliche Penetrationszeiten wurden ermittelt: *Gruppe 1*: 147 Tage; *Gruppe 2*: 143 Tage; *Gruppe 3*: 76 Tage; *Gruppe 4*: 96 Tage. Das Mehrschicht-Adhäsivsystem *Syntac Classic* in Kombination mit *Tetric Flow* zeigte die höchste Effizienz gegen bakterielle Penetration mit den längsten Penetrationszeiten aller experimentellen Gruppen. Statistisch zeigten sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den einzelnen Gruppen. *Tetric Flow* und *Grandio Flow* zeigten in Kombination mit *Syntac Classic* jedoch eine bessere Abdichtung gegenüber Bakterienpenetration als *Clearfil Flow/Syntac Classic*. Dagegen zeigte *Tetric Flow* in Kombination mit *Clearfil SE Bond* eine sichtbare, aber nicht signifikant schnellere, bakterielle Penetration verglichen mit *Syntac Classic*.

1.4 Schlussfolgerungen

Der koronale Verschluss nach Obturation zeigte die höchste Effizienz bei Verwendung von *Syntac Classic* in Kombination mit *Tetric Flow* und *Grandio Flow*. *Clearfil Flow* zeigte eine geringere Abdichtungseffizienz bei Verwendung von *Syntac Classic*. Die Verwendung von *Clearfil SE Bond* war hinsichtlich der Verhinderung einer Bakterienpenetration weniger effektiv als *Syntac Classic*. Somit ist die Kombination von Adhäsivsystem und Komposit entscheidend für die Qualität des bakteriendichten, koronalen Verschlusses.

2 Summary

2.1 Objectives

A permanent bacteria-tight filling of the access cavity including a hermetic seal of the pulp chamber floor following obturation of the root canal system is the aim of endodontic treatment. Only this procedure allows the prevention of bacterial invasion of the root canal system over time and subsequently avoids a bacterial recolonisation of the periapex.

During the recent years adhesive restorative materials became the material of choice for coronal restorations of endodontically treated teeth. Nevertheless, regarding the sealing efficiency of these materials there remain several questions unanswered.

The present study aimed to assess the efficiency of coronal seals following obturation to prevent bacterial ingress by means of a long-term bacterial leakage analysis *in vitro* over 365 days.

2.2 Materials and Methods

Standard access cavities in 40 extracted human teeth were prepared and root canals were instrumented to size 40 taper .04 using *FlexMaster* rotary instruments. After final irrigation sequence with 2 ml of sodium hypochlorite 5%, citric acid 40%, and alcohol 96% canals were dried with paper points and laterally compacted with *AH Plus* and gutta-percha points.

After cleaning of the coronal using foam pellets and etching with phosphoric acid (37%) the coronal seal of the canal orifices was carried out with the following restorative materials resulting in a layer of 2 mm thickness: group 1: *Tetric Flow* + *Syntac Classic*, group 2: *Grandio Flow* + *Syntac Classic*, group 3: *Clearfil Flow* + *Syntac Classic*, group 4: *Tetric Flow* + *Clearfil SE Bond*.

Each tooth was mounted in a two-chamber device and the prepared unit was gamma-sterilised. The upper chamber of each two-chamber device was inoculated with a standardised volume of 5 ml of bacteria suspension (*L. paracasei* ATCC 11578) and the lower chamber was filled with 10 ml of sterile *Schaedler* broth. The lower chambers were inspected daily for turbidity and the result was recorded. The bacteria suspension within the upper chamber was replaced by fresh suspension every 5th day.

2.3 Results

The following penetration times were observed: group 1: 147 days, group 2: 143 days, group 3: 76 days, group 4: 96 days.

The multi-step dentin bonding system *Syntac Classic* in combination with *Tetric Flow* revealed the best resistance against bacterial leakage with highest penetration times.

Statistically, there were no significant differences detected between the groups. However, *Tetric Flow* and *Grandio Flow*, both in combination with *Syntac Classic*, demonstrated better sealing efficiency than *Clearfil Flow/Syntac Classic*. In contrast, *Tetric Flow* in combination with *Clearfil SE Bond* revealed visible but not significant faster bacterial penetration compared with *Syntac Classic*.

2.4 Conclusions

Coronal seal following obturation revealed best sealing efficiency when *Syntac Classic* was used in combination with either *Tetric Flow* and *Grandio Flow*. *Clearfil Flow* showed less sealing efficiency in combination with *Syntac Classic*. *Clearfil SE Bond* was less effective in terms of bacterial seal than *Syntac Classic*. Therefore, the combination of the dentine bonding system and the flowable composite is crucial for the quality of the bacteria-tight coronal seal.

3 Einleitung

Ziel der endodontischen Therapie ist die vollständige Entfernung vitalen oder nekrotischen Wurzelkanalinhalt mit einer abschließenden Wurzelkanalfüllung, welche eine Bakterienfreiheit des periapikalen Gewebes sicherstellen soll. Eine Bakterienpenetration über das Wurzelkanalsystem führt zu einer Läsion der Periapikalregion, wobei das eindringende Substrat aus der Mundhöhle diesen Prozess aufrechterhalten kann und im Extremfall, beginnend mit einer *Parodontitis apicalis* zu einer akuten Exazerbation und möglicherweise nachfolgend zu einem Abszess führen kann. Eine Wurzelkanalfüllung allein ist nicht imstande, das Wurzelkanalsystem zuverlässig dauerhaft gegenüber dem Mundhöhlenmilieu zu versiegeln. Daher ist ein dichter und langfristig funktionierender koronaler Verschluss eine *Conditio sine qua non* für den Langzeiterfolg der endodontischen Therapiemaßnahme.

Historisch gesehen wurden zunächst nicht-adhäsive Materialien wie Zemente eingesetzt. Anfangs kamen aufgrund der Summe ihrer Eigenschaften Zinkoxid-Eugenol-Zemente zum Einsatz, welche eine hohe Dichtigkeit für damalige Verhältnisse aufwiesen, jedoch eine stärkere Löslichkeit besaßen. Neben Zinkoxid-phosphatzementen folgten Glasionomerezemente sowie das so genannte *Immediate Restorative Material (IRM)*, welche allesamt als Verschluss und zugleich Unterfüllung unter direkte Versorgungen wie Amalgam oder indirekte Restaurationen wie etwa Goldinlays, Teilkronen oder Kronen eingesetzt wurden.

In der Folgezeit kamen dann modernere Füllungswerkstoffe wie chemisch härtende, später auch lighthärtende Komposite zum Einsatz.

Mittlerweile sind zahlreiche Adhäsivsysteme auf dem Markt, welche durch die chemische Anbindung zum Dentin eine zuverlässige Verankerung von adhäsiven Restaurationen in Zahnkavitäten gestatten. Basierend auf diesen Ergebnissen war es das Ziel dieser Langzeitanalyse über einen Zeitraum von 365 Tagen, *in-vitro* zu untersuchen, ob diese Adhäsivsysteme – in der Verwendung zur koronalen Restauration nach endodontischer Therapie – Unterschiede hinsichtlich der bakteriellen Penetrationszeit aufweisen.

4 Literaturübersicht

Da eine Behandlung des Wurzelkanals sehr komplex ist, ist ein systematisches Vorgehen von großer Bedeutung. Beim Eröffnen der Pulpakammer mittels rotierender Instrumente wird das Pulpakammerdach vollständig entfernt, um einen geradlinigen Zugang zu den Kanaleingängen zu gewährleisten. Danach werden diese koronal erweitert und der gesamte Wurzelkanal chemomechanisch aufbereitet und so von vitalem oder infiziertem Gewebe gereinigt. Eine konische Erweiterung der Kanäle erleichtert die Aufnahme des Wurzelkanalfüllmaterials. Die Bestimmung der Zahnwurzellänge erfolgt entweder röntgenologisch, endometrisch oder durch gleichzeitige Anwendung beider Methoden.

Der Wurzelkanalsealer soll Spalträume im Kernmaterial und am Übergang zwischen Kernmaterial und Wurzelkanalwand verschließen [79]. Um diese Anforderungen zu erfüllen, müssen Sealer besondere physikalische, chemische und biologische Eigenschaften aufweisen. So muss beispielsweise das Sealmaterial zur Gewährleistung einer dauerhaften Abdichtung des Wurzelkanalsystems eine gute Gewebeverträglichkeit und eine ausreichende Dimensionsstabilität aufweisen [23, 131]. Nur in sorgfältig getrockneten Kanälen ist eine dichte Wurzelkanalfüllung möglich [151].

Eine koronale Wiederherstellung des Zahnes erfolgt heutzutage meist mit adhäsiven Materialien. Dabei kommt dem koronalen Verschluss der Wurzelkanalfüllung eine besondere Bedeutung zu [178]. Hinsichtlich des Zustands des apikalen Parodonts ist die technische Qualität der koronalen Restauration hier von größerer Bedeutung als die der endodontischen Behandlung [148].

4.1 Ziele der Wurzelkanalbehandlung

Zur effektiven Beseitigung der Bakterien aus dem Wurzelkanal werden insbesondere folgende Maßnahmen und Vorgehensweisen angewendet:

- Aseptische Behandlungsweise
- Aufbereitung des Wurzelkanalsystems
- Wurzelkanalspülung
- Einsatz medikamentöser Einlagen
- Wurzelkanalfüllung

Voraussetzung für eine erfolgreiche Behandlung ist die Einhaltung strikter aseptischer Behandlungsprinzipien. Das Operationsfeld muss durch Kofferdam isoliert und etwa mit Alkohol desinfiziert werden. Die zur Behandlung eingesetzten Instrumente müssen steril sein. Der Kofferdam verhindert eine bakterielle Kontamination durch Speichelzutritt, schützt den Patienten vor Aspiration oder Verschlucken von Instrumenten und beugt dem Übertreten von Spüllösungen in die Mundhöhle vor [53].

4.2 Die Wurzelkanalbehandlung

4.2.1 Die Wurzelkanalaufbereitung

Eine sorgfältige Reinigung und Bearbeitung des Wurzelkanals ist die Basis für eine erfolgreiche Wurzelkanalbehandlung. Dabei sollte möglichst das Pulpagewebe vollständig entfernt und die Keimzahl im Wurzelkanal reduziert werden. Unter Schonung der apikalen Konstriktion und des ursprünglichen Kanalverlaufs erfolgt eine konische Präparation des Wurzelkanals, um diesen mit genormten Guttapercha-Stiften obturieren zu können [52]. Der Eliminierung von Mikroorganismen kommt hier eine besondere Bedeutung zu [167]. Dazu wird der Wurzelkanal chemomechanisch unter Zuhilfenahme von Spüllösungen bearbeitet [165].

Die instrumentelle Wurzelkanalaufbereitung kann maschinell oder manuell durchgeführt werden. Neben der konventionellen Methode existieren verschiedene stärker individuelle konische Aufbereitungstechniken. Diese zeigen ein von koronal nach apikal mit der *Crown-down*-Technik oder von apikal nach koronal der *Step-back*-Technik gerichtetes Aufbereitungsmuster [33]. Je nach anatomischer Beschaffenheit der Zahnwurzel kann so die entsprechende Aufbereitungstechnik ausgewählt werden. Basierend auf Untersuchungen, ob die Größe der *Master*-Feile, also der letzten Feile vor Obturation, bei der Keimreduktion entscheidend ist [197] oder ob es Unterschiede zwischen manueller und maschineller Aufbereitung gibt [33], wurde die sogenannte *Hybrid*-Technik empfohlen, welche eine Kombination aus maschineller und manueller Aufbereitungstechnik darstellt [140].

Im Rahmen der Bearbeitung von Zahnhartsubstanzen (Schmelz, Dentin) entsteht grundsätzlich eine Schmierschicht (*smear layer*) [135]. Diese primär anorganische

Schicht besteht aus einem oberflächlichen und einem tiefen Anteil, kann homogen oder inhomogen sein, teils auch rissig oder schollenartig und zeigt weiter keine histologischen Besonderheiten [135]. Die Schmierschicht besteht aus denselben Bestandteilen wie die reguläre Dentinmatrix, also Mineral und Kollagen, Speichel, Blutzellen und Mikroorganismen und entsteht ausschließlich durch instrumentelle Bearbeitung der Dentineoberfläche [135].

4.2.2 Die Wurzelkanalspülung

Louis I. Grossman (1940) und *Willoughby Dayton Miller* (1980) sind zu erwähnen, wenn es um die Erprobung und Veröffentlichung zahlreicher Methoden zur Reinigung des Wurzelkanals geht [160]. Seit geraumer Zeit ist bekannt, dass im Rahmen der Aufbereitung des Wurzelkanals durch regelmäßiges Spülen eine effektive desinfizierende Wirkung erreicht wird. Dieser Prozess wird als chemo-mechanische Wurzelkanalaufbereitung bezeichnet. Dabei kommen der Spülung, insbesondere der Entfernung des Debris, und der im Rahmen der Wurzelkanalaufbereitung entstandenen Schmierschicht Bedeutung zu [106]. Die Anforderungen an Spüllösungen sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Auflösung von infiziertem nekrotischem Gewebe
Auflösung des <i>Smear layers</i>
Desinfektion
Biokompatibilität
Trocknung des Wurzelkanals
Wirtschaftlichkeit

Tab. 1: Anforderungen an endodontische Spüllösungen

Bei der Spülung des Wurzelkanals werden zur Vermeidung einer Verbolzung nekrotisches Pulpagewebe und bei der mechanischen Bearbeitung entstehende Dentinspäne aus dem Wurzelkanal herausgelöst. Die Spüllösungen dienen unter anderem als Gleitmittel, welches die Gefahr der Instrumentenfraktur reduzieren und deren Schneidleistung erhöhen soll. Nach jedem Instrumentenwechsel sollte der

Kanal mit einer ausreichenden Menge an Spüllösung gespült werden. Primär entscheidend für die Reinigungseffizienz der Spüllösungen ist das in den Kanal eingebrachte Spülvolumen [166].

In vielen Studien wurde die Wirkung von verschiedenen Spüllösungen wie z.B. Ethylalkohol, *EDTA*, Wasserstoffperoxid, Chlorhexidindigluconat, physiologische Kochsalzlösung, Natriumhypochlorit und Zitronensäure untersucht [8, 58, 185]. Von allen Spülflüssigkeiten hat sich *NaOCl* als die effektivste Spüllösung herausgestellt, da sie den besten gewebsauflösenden Effekt und die beste antibakterielle Wirkung erzielt [122]. Als Mittel der Wahl wird allerdings eine Kombination der verschiedenen Lösungen (*NaOCl*, Zitronensäure, Alkohol) in Form von Wechselfpülungen empfohlen, die die reinigende und desinfizierende Wirkung erheblich steigern [151, 185].

Die zur Spülung des Wurzelkanals eingesetzte Spülkanüle sollte möglichst weit, jedoch ohne zu verklemmen, in den Wurzelkanal eingeführt werden. Die Spülwirkung reicht nicht mehr als 2 mm über die Kanülenspitze hinaus. Daher sollten Wurzelkanäle mindestens bis zur ISO-Größe 35 aufbereitet werden. Bei stärkerer konischer Aufbereitung (taper .04 bis .06) reicht eine geringere apikale Aufbereitungsgröße. Ein sicheres Entfernen der bei der mechanischen Aufbereitung des Wurzelkanals entstehenden Schmierschicht kann nur durch aktivierte Spülungen erfolgen [142]. Durch Nutzung des Prinzips der Thermodynamik wird die in den Kanal eingebrachte Flüssigkeit erwärmt, so dass ein besserer Reinigungseffekt erzielt wird. Bei der Aktivierung mittels Ultraschalls wird die Bewegung der Flüssigkeitsmoleküle durch Vibration erhöht, was die Effizienz steigert [183]. Gebräuchliche Spüllösungen und deren Eigenschaften sind nachfolgend in Tabelle 2 zusammengestellt.

Spüllösung	Effekt
Natriumhypochlorit (NaOCl) 0,5 - 5%	<ul style="list-style-type: none"> - starke antimikrobielle Wirksamkeit, autosteril - starkes Oxidationsmittel - Bleichwirkung - gute Auflösung von nekrotischem Gewebe
Zitronensäure 30 - 50%	<ul style="list-style-type: none"> - Auflösung von Debris - verbessert die Wandständigkeit von Wurzelkanalsealern - wirkt als Schmiermittel, dass Instrumente nicht klemmen
Ethylendiamintetra- acetat (EDTA) 17%	<ul style="list-style-type: none"> - Chelatbildner, dadurch verbesserte Gleitwirkung - gute Wirkung in weiten Kanälen - begünstigt Penetration von Medikamenten in Seitenkanäle und Dentinkanälchen - entfernt Smear layer
Alkohol 70 - 96%	<ul style="list-style-type: none"> - wirkt fettlösend und desinfizierend - Trocknung des Wurzelkanals durch Verdunstung

Tab. 2: Eigenschaften in der Endodontie eingesetzter Spüllösungen

4.2.3 Die Trocknung des Wurzelkanals

Nach der chemo-mechanischen Aufbereitung des Wurzelkanalsystems erfolgt eine Abschlusspülung mit Alkohol (70 - 96%). Diese unterstützt durch Verdunstung das Trocknen des Wurzelkanals und erleichtert so die Diffusion von Medikamenten und Sealern in die Dentintubuli und Seitenkanäle. Die Trocknung des Wurzelkanals stellt einen wichtigen Schritt vor der Obturation dar [151]. Dabei reagieren Sealer auf Glasionomermzement-Basis auf Restfeuchtigkeit im Wurzelkanal empfindlicher als Sealer auf Zinkoxid-Eugenol-, Silikon- oder Calciumsalicylat-Basis [76]. Nach der Aufbereitung kann eine Spülung mit Alkohol die Trocknung des Wurzelkanals beschleunigen. Desweiteren werden größere Papierspitzen in den Wurzelkanal eingeführt und dann kleinere, die bis auf Arbeitslänge in den Kanal eingebracht werden können. Erst unmittelbar vor der Sealerapplikation sollte die letzte Papierspitze entfernt werden, um die Trockenheit im Wurzelkanal sicherzustellen [141].

Verschiedene Studien zeigten, dass die Trocknung mittels vier Papierspitzen und einer anschließenden Erwärmung bis auf 200°C, wie bei *Hosoya et al.* (2000) beschrieben, das beste Ergebnis erzielte, wobei die klinische Anwendung am Patienten selbstverständlich ausgeschlossen ist [76]. Zur Vermeidung eines Sauerstoffemphysems oder einer Infektionsausbreitung wird auf die Trocknung der Kanäle mit Druckluft verzichtet [50]. CO₂-Laser und Nd:YAG-Laser erwiesen sich nicht als geeignete Alternativen zur Trocknung mit Papierspitzen, da sie nicht zu einer zuverlässigen Dehydratation im Kanal führen und zudem die Gefahr einer Schädigung des Wurzeldentins und des Parodonts besteht [5]. Von der Firma *KaVo* wird zur Desinfektion und Trocknung des Wurzelkanals *Heal Ozone* empfohlen, eine Ozontherapie, die unter großem Zeitaufwand eine gute Bakterienreduktion im Kanal aufweist [78].

4.2.4 Die Wurzelkanalfüllung

Die Wurzelkanalfüllung hat die Aufgabe, das gesamte gereinigte Wurzelkanalsystem dauerhaft bakteriendicht zu verschließen, um so einer koronalen oder apikalen Reinfektion des Wurzelkanalsystems vorzubeugen. Als Material kommt dabei eine Wurzelkanalfüllpaste in Kombination mit einem soliden oder thermoplastischen Füllmaterial zur Anwendung. Im Bereich der Wurzelkanalsealer existieren verschiedene Materialien. Dabei basieren die klassischen Sealer auf Zinkoxideugenol, Diketon, Epoxidharz, Calciumsalicylat oder Glasionomermaterial. Zudem existieren seit einigen Jahren Sealer mit adhäsiven Eigenschaften. Dabei wird entweder ein spezieller Primer zur Vorbehandlung des Wurzelkanals eingesetzt oder der Sealer besitzt selbst-adhäsive Eigenschaften. Der wesentliche Faktor für eine zuverlässige Abdichtung des zuvor gründlich aufbereiteten, gereinigten und getrockneten Wurzelkanals sind die Eigenschaften des Wurzelkanalfüllmaterials [130]. Verschiedenen Einflüssen muss hierbei besondere Beachtung geschenkt werden. Von wesentlicher Bedeutung für die Dichtigkeit der Wurzelkanalfüllung sind insbesondere die Wechselwirkungen mit anderen Materialien oder mit dem Gewebe. Fehler beim Anmischen oder der Lagerung des Wurzelkanalfüllmaterials nehmen ebenfalls Einfluss auf dessen Beständigkeit. Die Qualität der Obturation hängt jedoch vor allen Dingen von der Haftung des Sealers am Dentin bzw. an der Guttapercha ab [100].

Als Material für die Wurzelkanalfüllung wird ein solides Kernmaterial in Form von Wurzelkanalfüllstiften in Kombination mit einer erhärtenden Wurzelkanalfüllpaste, dem Sealer, empfohlen [198]. Dabei sollen Inkongruenzen zwischen der Form der Wurzelkanalwand und der des Kernmaterials ausgefüllt werden. Ausschlaggebend für die Qualität einer Wurzelkanalfüllung ist die Verwendung eines geeigneten Sealers [194]. In Deutschland wird bislang eine Kombination von Sealer und lateral kondensierter Guttapercha als Standardtechnik zur Obturation von Wurzelkanälen gelehrt [85].

4.3 Untersuchung der Abdichtungseffizienz endodontischer Obturationen

4.3.1 Verfahren zur Analyse der Dichtigkeit

Für die Untersuchung der Dichtigkeit von Wurzelkanalsealern und Obturationstechniken wurden verschiedene Methoden eingesetzt. Es sind sowohl destruktive als auch nicht-destruktive Verfahren verfügbar. Dabei stellen die einzelnen Verfahren unterschiedliche Anforderungen an die Durchführung.

Zu den destruktiven Techniken zählt die Farbstoffpenetration, weil zur Auswertung der Farbstoffpenetration die Probe entweder geschnitten oder aufgelöst werden muss. Dabei kommen zumeist Tracer wie schwarze Tusche (*India Ink*) oder *Methylenblau* zum Einsatz [42, 174]. Auch Fluoreszenzfarbstoffe wie *Rhodamin-B* wurden vorgeschlagen [169]. Als Ergänzung wurden Farbstoffextraktionsmodelle vorgestellt [23, 37].

Zu den nicht-destruktiven Dichtigkeitsanalysen zählt die Mehrzahl der Techniken. Dabei gibt es das Bakterienpenetrationsmodell [178], die Endotoxinpenetration [179], Glukosepenetration [162, 196], Flüssigkeitsdurchströmung [16, 191], der Einsatz radioaktive Isotope sowie das elektrochemische Dichtigkeitsanalysemodell [83, 88].

4.3.2 Dichtigkeitseigenschaften endodontischer Wurzelkanalsealern

Dichtigkeitsuntersuchungen zeigen, dass die Undichtigkeiten bei Wurzelkanalobturationen primär im Bereich zwischen Wurzelkanalfüllung und Wurzelkanalwand entstehen [191]. Dabei kommt der Wurzelkanalfüllpaste eine besondere Bedeutung

zu [80]. Es konnte gezeigt werden, dass die Sealer der verschiedenen Materialgruppen unterschiedliche Dichtigkeitsergebnisse aufwiesen [151]. Dabei demonstrierten epoxidharz-basierte und silikon-basierte Sealer die besten Dichtigkeitsergebnisse. Calciumhydroxid- und Zinkoxideugenol-basierte Sealer sind hier prinzipiell aufgrund ihrer Löslichkeit langfristig im Nachteil [159]. Im Rahmen einer Ein-Jahres-Studie im Flüssigkeitspenetrationsmodell zeigte das calcium-salicylat-basierte *Apexit* höhere Undichtigkeiten im Vergleich zum epoxidharz-basierten *AH Plus* und dem Glasionomermaterial-Sealer *Ketac-Endo* [119]. Im Flüssigkeitstransportmodell stellte man keine signifikanten Unterschiede zwischen *AH Plus*, *Ketac-Endo* und dem Silikon-Sealer *RoekoSeal* fest [30]. Dagegen zeigte eine andere Studie eine signifikant bessere apikale Dichtigkeit für *AH Plus* im Vergleich zu *Ketac-Endo* und dem Zinkoxideugenol-Sealer *Fill Canal* [35]. Ähnliche Ergebnisse wurden auch in anderen Studien gefunden [89, 151]. Die Abdichtungseffizienz der beiden Epoxidharz-Sealer *AH 26* und *AH Plus* ergaben im Farbstofftestpenetrationstiefen vergleichbare Eindringtiefen bei Verwendung der koronalen und apikalen Kompaktionsstechnik, der Hybridkondensation und *Thermafil* [41].

Allerdings zeigte ein Bakterienpenetrationstest von *Miletic et al.*, dass eine Passage der Bakterien *S. mutans*, *S. mitis*, *P. melaninogenica*, *L. acidophilus* sowie von *C. albicans* entlang einer Wurzelkanalfüllung durch *AH Plus* nicht verhindert werden kann [119]. Eine aktuelle Untersuchung zeigte dagegen sogar sehr hohe Undichtigkeiten für die Kombination *AH Plus* und Guttapercha [126].

4.3.3 Dichtigkeitseigenschaften endodontischer Obturationstechniken

Die Einstifttechnik setzt voraus, dass der Wurzelkanal möglichst rund ist und ein volumenstabiler und unlöslicher Wurzelkanalsealer zum Einsatz kommt [36, 98, 159]. Ein nicht kongruenter Wurzelkanalfüllstift oder eine erhöhte Sealer-schichtstärke wirken sich hier nachteilig aus [14]. Da die Guttapercha nicht kondensiert wird, können einerseits Unebenheiten in der Kanalwand und Seitenkanälen nur unzureichend gefüllt werden [192]. Andererseits begründeten *Wu et al.* (2000) die besseren Resultate der Zentralstifttechnik gegenüber der lateralen oder vertikalen Kompaktion damit, dass der eingebrachte Sealer durch fehlende Kompaktionstechniken nicht wieder aus dem Kanal entfernt wird und so das Guttaperchamaterial keinen direkten Kontakt zur Wurzelkanalwand hat [194]. Unter optimalen Voraussetzungen lassen sich mit der Einstifttechnik dichte Obturationen erzielen [195].

Dabei belegten verschiedene Studien, dass keine Unterschiede zwischen den Obturationstechniken bestehen [7, 89].

Die Lateralkompaktion wird als Standardobturationstechnik gelehrt, da ein dichter Verschluss des Kanalsystems sowohl in gekrümmten als auch in ovalen Kanälen erzielt werden kann [38]. Die laterale Kompaktion ist die Wurzelkanalfülltechnik, an der andere Fülltechniken gemessen werden. In einigen Studien wurde sie für besser erklärt als andere Techniken [14]. So auch bei der Studie von *Beatty et al.*, in der weniger Farbstoffpenetration bei den Gruppen der lateralen Kompaktion, als bei denen der Zentralstifttechnik auftrat. Voraussetzung dafür war, dass die richtige Technik der lateralen Kompaktion angewendet wurde. In anderen Berichten wurde sie hinsichtlich ihrer Abdichtung als genauso effizient beschrieben wie die anderen Techniken [97]. Mit der lateralen Kompaktion wird eine homogene, dichte Wurzelkanalfüllung mit möglichst viel Guttapercha und möglichst wenig Sealer angestrebt. Es konnte gezeigt werden, dass dickere Sealerschichten zu erhöhten Undichtigkeiten führten [36]. Nachteile entstehen durch den Einsatz von Spreadern bedingten Hohlräumen ("*spreader tracts*") [65]. Spreader dringen tiefer in den Wurzelkanal ein und hinterlassen eine Riefe auf der Oberfläche des Guttaperchastiftes.

Facer und Walton (2003) demonstrierten, dass durch das Anwenden von einem Spreader Druck entsteht und so das Wurzelkanalfüllungsmaterial aus dem Wurzelkanal herausgepresst wird [54]. Somit erfolgte ein direkter Kontakt von den Guttapercha-Stiften mit der Kanalwand. Die so bei der lateralen Kompaktion entstandenen fehlenden Sealer-Bereiche wurden auch von weiteren Studien erwähnt [54]. Durch eine Kombination der Lateralkompaktion mit der vertikalen Kompaktion im Sinne einer Hybridtechnik resultieren noch bessere Dichtigkeitswerte [71]. Die sogenannte *Non-compaction*-Technik konnte demonstrieren, dass hiermit ebenfalls sehr gute apikale Dichtigkeitsergebnisse zu erzielen sind [75].

Mit dem *Thermafil*-System werden mehr Seitenkanäle und ein höherer Anteil am Kanalvolumen gefüllt als mittels der lateralen Kompaktion [36, 67]. Allerdings penetrierte in weiteren Studien die Guttapercha bei der Lateralkompaktion weiter apikalwärts und erzeugte somit eine stärkere Überpressung von Guttapercha [45]. Es gelingt mit *Thermafil* den Sealeranteil zum Guttaperchaverhältnis wesentlich kleiner zu halten und damit auch die Blasenbildung zu reduzieren [36, 38]. Im Vergleich zur Lateralkondensation ergaben sich keine signifikanten Unterschiede [36].

4.4 Materialbedingte Ursache der Mikroleakage

Sowohl Sealer als auch Füllungsmaterialien zeigen unterschiedliche oder auch gar keine Polymerisationseffekte. Dabei sind sowohl eine initiale Materialschumpfung als auch eine Expansion möglich. Wurzelkanalsealer zeigen zumeist eine Materialschumpfung, in manchen Fällen jedoch auch eine Expansion [131]. Diese sind im Bereich der Wurzelkanalsealer primär durch die Löslichkeit des Sealers bedingt, Expansionen zumeist durch Wasseraufnahme [111]. So konnte am Beispiel von *AH Plus* gezeigt werden, dass initial eine leichte Expansion (0,9%) erfolgt, welche innerhalb von vier Wochen auf 1,2% ansteigt. Silikone dagegen zeigen sich hier auch langfristig volumenstabil [131]. Problematisch ist jedoch die hohe Löslichkeit von Methacrylaten, da es hierbei zu einer starken Expansion (10,34%) kommt [111]. Dies hat zur Folge, dass es zu einer Porosität des Sealers kommt und aufgrund der Expansion potenziell auch eine Spannungserhöhung innerhalb des Wurzelkanals eintritt. Die klinische Relevanz von Undichtigkeiten ist jedoch nicht vollständig geklärt. Die Auswirkungen der Wasseraufnahme auf die Integrität des Wurzelzementins sind bislang noch nicht untersucht worden.

4.5 Die Problematik der Mikroleakage bei koronal nicht verschlossenen Zähnen nach endodontischer Behandlung

Ein insuffizienter Verschluss des Wurzelkanalsystems spielt für die Prognose einer endodontischen Behandlung eine wesentliche Rolle [92]. Es wurde schon früh gezeigt, dass der Grund für das Fehlschlagen einer Wurzelkanalbehandlung auf Unzulänglichkeiten der Wurzelkanalfüllung oder einen inadäquaten koronalen Verschluss des Wurzelkanalsystems zurückzuführen ist [178]. Über den Wurzelkanal können insbesondere Bakterien in das Wurzelkanalsystem eindringen, woraus eine inflammatorische Antwort resultiert, welche die typischen klinischen und radiologischen Zeichen einer fehlgeschlagenen Wurzelkanalbehandlung zeigt [172]. Eine gute und sofortige Restauration wurde als Maßnahme nach der endodontischen Therapie gefordert [3, 152]. Dabei zeigten provisorische Verschlüsse signifikant höhere Undichtigkeiten als permanente Restaurationen [182].

Swanson und Madison (1987) untersuchten, welche Rolle koronale Mikroleakage bezüglich der Prognose von Wurzelkanalbehandlungen spielt [172]. Obturierte Wurzelkanäle können eine koronale Bakterienrekontaminierung erfahren, wenn sie

nicht mittels einer koronalen Füllung vor der Mundflora geschützt sind. Somit ist ein Zutritt von Bakterien in das periapikale Gewebe über das obturierte Wurzelkanalsystem möglich. Zum einen kann eine koronale Rekontamination durch ein Kariesrezidiv auftreten. Zum anderen sind Frakturen des Füllungsmaterials sowie von Zahnstrukturen, aber auch der Verlust der permanenten Restauration eine mögliche Ursache für die Exposition des gefüllten Wurzelkanalsystems gegenüber dem Mundhöhlenmilieu [92].

Swanson und Madison (1987) stellten durch Farbstoffpenetrationstests fest, dass koronal unverschlossene, jedoch mit Guttapercha und Sealern obturierte Wurzelkanäle, die Bakterien ausgesetzt waren, bereits nach 3 Tagen der Exposition die gleichen ausgedehnten Penetrationstiefen wie nach acht Wochen zeigten [172]. Somit wurde das Zustandekommen einer Leakage aufgrund einer möglichen Auflösung des Sealer-Materials durch das Hinzutreten von Speichel und damit die Schaffung eines Hohlraumes für die Bakterienpenetration entlang der Wurzelkanalfüllstifte und in die koronalen Tubuli als Ursache belegt. Die koronale Mikroleakage stellt also einen wesentlichen Faktor für das Versagen einer Wurzelkanalbehandlung dar [172].

Khayat et al. (1993) zeigten, dass gefüllte Wurzelkanäle – unabhängig von der Obturationstechnik – ohne einen koronalen Verschluss in weniger als 30 Tagen vollständig rekontaminiert waren [92]. *Siqueira et al.* (2000) belegten, dass keine der derzeit gängigen Wurzelkanalfülltechniken (*continuous wave technique*, laterale Kompaktion, *Thermafil*-Technik) einen bakteriendichten Verschluss ermöglicht [166]. Ebenfalls waren hier aufgrund der bestehenden koronalen Undichtigkeiten nach 30 Tagen mehr als 50% und nach 60 Tagen 100% der Proben bakteriell rekontaminiert [166]. Auf der Suche nach einem optimalen Verschluss der Wurzelkanäle konnte dieser auch in Experimenten mit verschiedenen Sealertypen nicht erzielt werden. Die eingesetzten Sealmaterialien zeigten in der Potenz, Bakterienpenetration zu verhindern, keine signifikanten Unterschiede, wenn eine Exposition dem Mundmilieu gegenüber stattgefunden hat. Die Wurzelkanäle zeigten bereits nach 7 Tagen eine profunde mikrobielle Kontamination [172].

Chailertvanitkul et al. (1997) untersuchten mittels eines polymikrobiellen Markers, bestehend aus *Streptococcus sanguis* und *Prevotella intermedia*, die koronale Leakage von gefüllten Wurzelkanälen unter der Verwendung von zwei verschiedenen Sealertypen [27]. Auch diese Studie ergab, dass keiner der Sealer in

der Lage war, den koronalen Zutritt der mikrobiellen Mischflora zu verhindern. Nach sechswöchiger Lagerung in künstlichem Speichel konnte kein signifikanter Unterschied hinsichtlich der Leakage zwischen beiden Sealern gefunden werden. Hier fanden sich ebenfalls schon sehr früh Undichtigkeiten [27].

Eine Kontamination des gefüllten Wurzelkanalsystems bedingt durch eine koronale Leakage, nachdem es den Bedingungen der Mundhöhle ausgesetzt ist, kann – einzeln oder auch in Kombination – auf folgende Arten stattfinden:

1. Auflösung des Sealers durch Speichel sowie Gewebsflüssigkeiten
2. Eindringen von Speichel und Bakterien in das Interface zwischen Sealer und den Wurzelkanalwänden
3. Penetration von Speichel und Bakterien zwischen Sealer und Guttapercha [166]
4. Eindringen von Speichel und Bakterien durch randspaltige Restaurationen [102]

In einem *In-vitro*-Bakterienpenetrationstest untersuchten *Torabinejad et al.* (1995) die Dauer einer vollständigen Penetration von Mikroorganismen entlang des Wurzelkanals bei koronal nicht verschlossenen Zähnen, wenn der oberste Anteil des Wurzelkanalsystems der oralen Flora ausgesetzt war [177]. Dabei zeigten über 50% der Zähne, die dem *Staphylococcus epidermidis* ausgesetzt waren, bereits nach 19 Tagen eine vollständige Kontamination. Nach 42 Tagen waren 50% der mit *Proteus vulgaris* kontaminierten Zähne, vollständig penetriert [177]. Dies war ein Beleg dafür, wie rasch eine Kontamination aufgrund einer vorhandenen oder entstehenden Mikroleakage bei direktem Kontakt des gefüllten Wurzelkanalsystems mit dem Mundmilieu stattfinden und fortschreiten kann. Die zahlreichen Studien zur Problematik der Mikroleakage in koronal unverschlossenen Wurzelkanälen empfehlen einen möglichst dichten koronalen Verschluss in Ergänzung zu einer apikalen Wurzelkanalfüllung [92, 178].

4.6 Intrakoronales Sealing der Kanaleingänge und adäquate koronale Restauration zur Vorbeugung einer Mikroleakage

Bei einem Versorgen oder Fehlen des koronalen Verschlusses können Mikroorganismen und ihre Begleitprodukte sowie andere im Speichel gelöste Stoffe über

die Spalträume ins periapikale Gewebe gelangen und somit eine Revision der Wurzelfüllung erforderlich machen [166]. Aufgrund dieser Erkenntnisse, die vor allem in den oben genannten Bakterienpenetrationstests ermittelt wurden, ist die Revision einer endodontischen Füllung schon nach sehr kurzer Zeit der Exposition der oralen Flora gegenüber nötig, bevor eine permanente Versorgung erfolgen kann. *Magura et al.* empfehlen, die Durchführung einer Revision, wenn die koronalen Anteile einer Wurzelfüllung dem Mundhöhlenmilieu mindestens 3 Monate ausgesetzt waren [108]. Je nach Sealer und Obturationstechnik kann die Revision allerdings schon nach deutlich kürzeren Kontaminationszeiten erforderlich werden [151, 175]. Da kein Wurzelkanalfüllmaterial und keine Fülltechnik in der Lage ist, eine Bakterienkontamination langfristig zu verhindern, muss darüber nachgedacht werden, durch restaurative Materialien als zusätzliche intrakoronale Barrieren, also koronal der Kanaleingänge die Gefahr einer Mikroleakage zu reduzieren [64, 190].

Lange Zeit ging man davon aus, dass für eine erfolgreiche endodontische Behandlung primär eine effektive apikale Versiegelung notwendig sei, jedoch ist für den endgültigen Therapieerfolg eine suffiziente koronale Abdichtung gleichermaßen erforderlich [15]. *Ray* und *Trope* behaupteten sogar, dass die Beschaffenheit der koronalen Restauration für den Zustand des apikalen Parodonts möglicherweise signifikant entscheidender sei als die technische Qualität der endodontischen Behandlung [148]. Diese Beobachtungen werden von *Klevants* und *Eggink* geteilt, die zeigten, dass periradikuläre Knochenläsionen um Zähne mit ungefüllten Kanälen ausheilen konnten, solange der Kanal nur aufbereitet, von Bakterien gereinigt war und eine suffiziente koronale Barriere angelegt wurde [94]. Somit wurde empfohlen, die koronale Zugangskavität nach der endodontischen Therapie möglichst direkt definitiv zu verschließen, um eine Kontamination mit Flüssigkeiten und Bakterien aus der Mundhöhle zu verhindern [74].

4.7 Nicht-adhäsive Materialien für den koronalen Verschluss

Eine Vielzahl von Materialien wurde auf ihre Fähigkeit hin untersucht, um als koronale Barriere zum Schutz vor Mikroleakage zu fungieren. Man beschäftigte sich in der Vor-Adhäsiv-Ära vor allem mit Glasionomerzement, *IRM*, Amalgam, Zinkoxid-Phosphat-Zement, *Barrier Dentine Sealant*, Mineral Trioxide Aggregate (*MTA*), *Cavit*, *Super EBA* Zement und Zinkoxid-Eugenol-Zement [70, 158]. Es konnte

gezeigt werden, dass das Platzieren eines koronalen Verschlusses generell zu signifikant geringeren Undichtigkeiten führt [24].

Barthel et al. zeigten, dass *IRM* (immediate restorative material, ein Zinkoxid-Eugenol-Zement, verstärkt durch Polymethylmethacrylat) kombiniert mit Glasionomerzement bzw. Glasionomerzement für sich alleine einer Bakterienpenetration in den Periapex noch am besten entgegenwirken können. Sie begründeten dies damit, dass Polyalkenoatzemente einen chemischen Verbund mit Dentin eingehen. Das ebenfalls getestete *Cavit* zeigte die schnellste Versiegelungseffizienz [11]. Die Eignung von *IRM* als Material für einen bakteriendichten Verschluss endodontischer Zugangskavitäten wurde allerdings von *Anderson et al.* widerlegt. Sie zeigten, dass alle Zähne, deren Trepanationsöffnung mit *IRM* restauriert worden waren, nach thermischer Wechselbelastung bereits nach 7 Tagen eine signifikant messbare Mikroleakage aufwiesen [6]. Ebenso stellte *Galvan et al.* bei der Untersuchung von *IRM* für den koronalen Verschluss eine ausgedehnte Undichtigkeit fest [64]. *Carman* und *Wallace* (1994) untersuchten Amalgam, *IRM*, Glasionomerzement und lichterhärtendes Komposit hinsichtlich ihrer Eignung für den Verschluss der koronalen Kavität [24]. Sie zeigten, dass Glasionomerzement – am Kanaleingang oberhalb der Guttapercha platziert – die Leakage besser als alle anderen Materialien reduziert. Jedoch konnte auch hier keines der getesteten Materialien das Entstehen von Mikroleakage gänzlich verhindern [24].

Saunders und *Saunders* forderten, dass der Boden des Pulpakavums und somit der koronale Anteil des Wurzelkanalsystems nach dem Füllen und dem Entfernen überschüssiger Guttapercha und restlichen Sealers mit einer dünnen Schicht Glasionomerzement ausgekleidet werden sollte und die Zugangskavität, sofern sie nicht sofort definitiv versorgt werden kann, mit einer mindestens 3,5 mm dicken Schicht eines geeigneten provisorischen Füllungsmaterials gefüllt werden sollte, um Leakage zu reduzieren [158]. Ihrer Ansicht nach erhöht dies insbesondere bei endodontisch behandelten Molaren die Erfolgsraten, da hier oft akzessorische Kanäle, ausgehend vom Boden des Pulpakavums, ihren Ursprung haben. Eine Kontamination dieser Kanäle vom Boden der ehemaligen Pulpakammer kommend, ausgehend von der Furkation, konnte zu einer inflammatorischen Reaktion des gesamten parodontalen Gewebes durch Mikroorganismen oder deren Toxine führen. Durch das "*Lining*" des Kavumbodens und der Kanaleingänge mit einem kunststoffverstärktem Glasionomerzement konnte in einer anderen Studie eine sehr effektive Barriere zur Prävention der mikrobiellen Leakage geschaffen werden [28].

Diaz-Arnold und *Wilcox* allerdings untersuchten ausschließlich Glasionomerzemente als Basis unterhalb von Kompositen im Hinblick auf die erzeugende koronale Dichtigkeit. Sie beobachteten eine signifikante Undichtigkeit. Auch ein Anätzen des Dentins vor der Applikation des Polyalkenoat-Zementes zeigte keine erhöhte Versiegelungseffizienz [44]. *Wilcox* und *Diaz-Arnold* fanden für Zähne und koronale Verschlüsse mit Zinkoxid-Phosphat-Zement unter definitiven Restaurationen aus Glasionomerzementen bzw. adhäsiv verarbeiteten Kompositen signifikante Undichtigkeiten [189]. *Beckham et al.* (1993) verglichen 3 Materialien hinsichtlich ihrer koronalen Sealerqualitäten und stellten fest, dass *Barrier Dentine Sealant* zwar signifikant weniger Mikroleakage zuließ als Glasionomerzement. Allerdings kann auch dieses Material nicht als absolute Sickerbarriere fungieren [15].

Wurden natürliche oder künstlich angelegte Kanäle im Bereich der Furkation von Molaren versiegelt, konnte bei der Verwendung von Amalgam eine höhere Undichtigkeit beobachtet werden. Sie stellten dabei fest, dass in Verbindung mit Amalgam, wenn es für diesen Zweck Verwendung fand, mehr Leakage nachweisbar war als bei anderen Materialien [187]. Versuche des Verschlusses mit *Cavit*, *IRM* und *Super-EBA*-Zement als koronale Füllungsmaterialien zur Vorbeugung vor Undichtigkeiten zeigten, dass Wurzelkanäle ohne Verschluss des Kanaleingangsbereiches signifikant mehr Undichtigkeiten aufwiesen als solche, die ein intraorifiziales Sealing erhalten hatten. Dennoch waren bei allen Wurzeln, die mit *Cavit*, *IRM* und *Super-EBA*-Zement koronal versorgt waren, in weniger als 49 Tagen Leakage zu beobachten [144].

Da in der Endodontie derzeit kein Wurzelkanalfüllmaterial einen zuverlässigen bakteriendichten Verschluss des Wurzelkanals ermöglicht, wurde das Placement dentinadhäsiver Verschlüsse als Möglichkeit der Abdichtung des Wurzelkanalsystems gegenüber der Mundhöhle untersucht. Dabei zeigten diese Materialien einen sehr effizienten flüssigkeitsdichten Verschluss der obturierten Wurzelkanäle [16]. In diesem Zusammenhang wurde primär der Frage nachgegangen, ob der Einsatz von Dentinbondingsystemen Fortschritte auf dem Gebiet des koronalen Verschlusses der Wurzelkanaleingangsbereiche bringen könnte.

4.8 Adhäsive Materialien für den koronalen Verschluss

4.8.1 Grundlagen der Adhäsivtechnik

Die Ultrastruktur von Dentin konnte mittels der *REM*-Untersuchungen von *Pashley et al.* (1993) gezeigt werden und belegt die Bedeutung der Adhäsivtechnik. Der Vergleich der Struktur von frakturiertem und von mit *Smear layer* bedecktem Dentin zeigte deutliche Unterschiede. Nicht von *Smear layer* bedecktes Dentin zeigte Dentintubuli von etwa 1 µm Durchmesser, welche von einer peritubulären Dentinmatrix von ebenfalls 1 µm Stärke umgeben waren. Das intertubuläre Dentin stellte sich im *REM* als raue, mineralisierte Oberfläche mit nur wenigen Porositäten dar. Nach einer Ätzung für 30 Sekunden mit 37%iger Phosphorsäure vergrößerte sich der Durchmesser der Tubuli auf ca. 3 µm aufgrund des Verlusts von peritubulärem Dentin. Infolge der Ätzung erhöht sich auch die Porosität des intertubulären Dentins. Die Demineralisationstiefe betrug im Durchschnitt etwa 5 µm. Die Entfernung von Apatit demaskiert das Netzwerk aus Kollagenfasern, wobei die einzelnen Fasern etwa 100 nm dick sind. Alle diese Veränderungen infolge von Säureätzung bieten mikromechanische Bondingmöglichkeiten, wobei die Adhäsive in die entstandenen Räume und Porositäten fließen können [137].

4.8.2 Die Dentinstruktur im Bereich der Pulpakammer

Während zahlreiche Studien zum Verbund von Kompositen zu Schmelz und koronalem Dentin vorliegen [62, 127], sind nur wenige Ergebnisse über die Adhäsion von Kunststoffen an der Wand der Pulpakammer bekannt. So untersuchten *Belli et al.* die Haftkräfte an verschiedenen Bereichen von Wänden der Pulpakammer und legten dabei besonderes Augenmerk auf Microtensile-Experimente an Dentin aus dem Boden, den Wänden, dem Dach und der Region der Pulpahörner, wobei zwei verschiedene Adhäsivsysteme untersucht wurden [16]. Die *REM*-Untersuchungen zeigten, dass regionale Unterschiede in der Dentinstruktur existieren. Verglichen mit dem Dach der Kammer war die Tubuli-Dichte am Boden des Kavums viel geringer. Die Ergebnisse zeigten, dass zwischen dem Kunststoff und den verschiedenen Regionen der Pulpakammer dennoch recht hohe Haftwerte erreicht werden können. Dies sollte laut *Belli et al.* (2001) die Applikation einer dicken Schicht ungefüllten Komposites auf den Boden des Kavums und die

Kanaleingänge als eine zweite, Schutz gebende Versiegelung nach erfolgter Wurzelkanalbehandlung erlauben [16].

Akagawa et al. (2002) untersuchten auch regionale Unterschiede in den Bonding-Fähigkeiten von Adhäsivsystemen und verglichen Haftwerte von Bonding-Systemen am Boden der Pulpakammer mit den Werten an superfiziell und tiefem koronalem Dentin [2]. Sie stellen dabei fest, dass bei beiden Systemen, die zu diesem Zweck Verwendung fanden, die Haftkraft jeweils am Boden der Kammer geringer war als etwa an superfiziell, koronalem Dentin. Als Gründe hierfür wurden die typischen morphologischen Charakteristika in der Dentinmatrix angesehen, wobei die Tubuli im Dentin des Pulpakavumbodens durchschnittlich kleiner waren als im Bereich des superfiziellen oder tiefen koronalen Dentins. *REM*-Untersuchungen zeigten zudem, dass die Hybridschicht im Bereich des oberflächlichen und tiefen koronalen Dentins recht ausgeprägt war. Zudem waren auch die Kunststoffzotten (*tags*), die in die Tubuli penetrierten, im Durchmesser größer. Kunststoffzotten im Bereich des Kammerbodendentins waren hingegen weniger zahlreich und auch schlanker [2].

Toba et al. beschrieben Dentin als ein heterogenes Substrat, dessen Struktur sich mit der Lokalisation ändert [176]. Es existieren morphologische und strukturelle Variationen, welche einen Einfluss auf den Haftverbund der Bonding-Systeme haben. In *Micro-shear-bond-strength*-Tests zeigte etwa koronales Dentin auch bei *Toba et al.* (2003) eine höhere Haftkraft (ca. 40 MPa) als Pulpakammerbodendentin (ca. 30 MPa). Als Erklärung für dieses Phänomen konnte anhand von *REM*-Untersuchungen gezeigt werden, dass im Kammerbodendentin die Tubuli dünner und unregelmäßiger sind. Daher wurde eine geringere Anzahl an Zotten, die zugleich dünner und kürzer sind, sowie eine Hybridschicht dünner als in koronalem Dentin beobachtet. Unregelmäßigkeiten in der Dentinstruktur, die bei Betrachtung der Tubuli offensichtlich werden, werden als Resultat der Ablagerung mineralischer und organischer Komponenten infolge der Odontoblastentätigkeit beschrieben. Dies führt dazu, dass dieses Dentin reicher an organischem Material ist als etwa koronales Dentin. Diese morphologischen Differenzen senken die Penetrationsfähigkeit von Kunststoffmonomeren [176].

4.8.3 Mechanismus der adhäsiven Anbindung an das Dentin

Die *Schmelz-Ätz-Technik* geht auf *Buonocore* zurück, welcher erstmals Phosphorsäure zur Erhöhung der Retention von Acrylaten an Schmelz untersuchte [21]. Die im Rahmen der Adhäsivtechnik erzeugte, etwa 5 µm dicke, kunststoffinfiltrierte Oberflächenzone von gebondetem Dentin wird auch als *Hybrid-Layer* bezeichnet. Hydrophile Kunststoffmonomere können in diese säuregeätzte, poröse, demineralisierte Dentinoberfläche infiltrieren und so eine Mikroretention erzeugen. Durch Säureätzung kann Apatit zwischen den Kollagenfasern entfernt werden, so dass ein retikuläres Netzwerk von interfibrillären Diffusionskanälen etabliert wird, zwischen dem eine Kunststoffinfiltration stattfinden kann [137]. Nach der Infiltration hydrophiler Monomere in das demineralisierte Dentin resultiert ein spaltfreier *Kunststoff-Kollagen-Hybrid-Layer*, welcher hohe Haftwerte des Komposites zur Zahnhartsubstanz gestattet und die Entstehung von Mikroleakage erschwert wird [123].

Die charakteristische Permeabilität ist, wenn es um Dentin-Bonding geht, von besonderer Bedeutung, weil die meisten gegenwärtigen Dentinbondingsysteme auf einer Kunststoffpermeation oder -infiltration des Dentins basieren. Als transdentinale oder intratubuläre Permeation kann man die Infiltration des Dentins entlang der Dentintubuli bezeichnen. Wenngleich auch der Kunststoff in die Tubuli penetriert um Kunststoffzapfen zu formen, welche die Haftung im Bereich des Dentin-Kunststoff-Interfaces durch die Schaffung nicht-paralleler Retentionen steigern können, ist doch der wichtigste Faktor für das Dentinbonding die Permeation von Kunststoff in das intertubuläre Dentin – einen Prozess, den man als intradentinale Permeation bezeichnen kann [137]. So ist die Permeabilität von Dentin gegenüber Dentin-adhäsiven von entscheidender Bedeutung für das Erreichen eines akzeptablen Dentin-Haftverbundes. Adhäsiv-Systeme, welche die Schmierschicht vollständig entfernen, erlauben dem Kunststoff, sowohl die Tubuli als auch das intertubuläre Dentin zu infiltrieren. Die Kunststoffpenetration der Tubuli kann diese effektiv versiegeln und die Haftkraft erhöhen. Die Infiltration von Kunststoff in das intertubuläre Dentin erfolgt nur dann, wenn der mineralische Anteil im Rahmen der Konditionierung des Dentins mit Säuren oder Chelatoren entfernt wird. Diese Infiltration ist aufgrund der vorhandenen Kollagentrümmer, die nach der Säureätzung auf der Oberfläche verbleiben, bei schmierschicht-bedeckter Dentinoberfläche wesentlich schwieriger. Zusätzlich zur Infiltration des Dentins in die Tubuli und des intertubulären Dentins bietet auch nach der Säureätzung eine Diffusion in

perifibrilläre Räume rund um die Kollagenfasern große mikroretentive Verankerungsmöglichkeiten [137].

4.8.4 Adhäsivtechnik in der Endodontie

In der Endodontie wurden adhäsive Effekte erstmals mit Glasionomerzement-Sealern (*Ketac-Endo*) realisiert. Die hierbei erzeugten Retentionswerte liegen jedoch deutlich unter den für Komposit gefundenen Werten. Wie oben bereits beschrieben, wurde eine Vielzahl von Untersuchungen mit verschiedenen Restaurationsmaterialien durchgeführt, die einen effektiven Verschluss des Pulpenkammerbodens herbeiführen sollten. Allerdings war keines der Materialien in der Lage, dies adäquat zu leisten. Dentinbondingsysteme wurden überall in der Zahnheilkunde eingesetzt, um den Verbund zwischen Restaurationsmaterialien und Dentin zu verbessern und so einer Mikroleakage unter definitiven Versorgungen vorzubeugen [190]. Im Jahre 2002 noch waren *Ferrari et al.* der Meinung, dass adhäsive Systeme in der Endodontie nur für zwei Zwecke Verwendung finden könnten: zum einen als Wurzelkanalfüllungsmaterial, zum anderen um Stiftsysteme vor ausgedehnten Aufbauten nach endodontischer Behandlung effektiv im Kanalsystem zu verankern [59]. Wenngleich ersteres nach eindeutigen Ergebnissen wenig Zuspruch fand, erfreut sich heute die Möglichkeit einer adhäsiven Stifteingliederung großer Beliebtheit [59].

4.8.5 Eigenschaften adhäsiver Füllungsmaterialien für den koronalen Verschluss

Schrumpfung und Haftverbund

Füllungsmaterialien für den koronalen Verschluss zeigen in den meisten Fällen eine Schrumpfung [87]. Glasionomerzemente besitzen gewisse, wenn auch schwache adhäsive Eigenschaften, welche durch eine chemische Anbindung der Polyalkensäuren an das Kollagengeflecht des Dentins zum Tragen kommen. Dennoch kommt es bei diesem Material, auch bei Verwendung von Dentin-Conditionern nicht zur Ausbildung von Zotten, welche eine Erhöhung der Verbundfestigkeit erzeugen könnten [48]. Zudem weisen Glasionomerzemente eine leichte initiale Schrumpfung auf [9]. Ferner zeigen sie eine zeitabhängige Degradation [43].

Die zumeist zur Schaffung eines koronalen Verschlusses eingesetzten Materialien zeigen eine gewisse Volumenschrumpfung [40, 56]. Übersteigt die Schrumpfkraft den adhäsiven Verbund zum Dentin, so resultiert zumeist eine einseitige Ablösung (*Detachment*) des Füllungsmaterials mit einer Spaltbildung [40]. Aufgrund der durch die Adhäsivtechnik erzeugte Oberflächenvergrößerung und der Verarbeitung in der Inkrementtechnik können diese negativen Faktoren jedoch wesentlich verringert werden [101, 127, 134]. Im Rahmen der Verwendung von dentinadhäsiv verarbeiteten Füllungsmaterialien wie Kompositen kann die materialbedingte Schrumpfung durch die sogenannte *Inkrement-Schicht*-Technik reduziert werden, wodurch sich auch die Breite des schrumpfbedingten Spaltes reduzieren lässt [134]. Allerdings hängt die kompositbedingte Schrumpfung stark von der Formulierung des Materials ab [51, 69]. Ferner sind Volumenänderungen von Füllungsmaterialien durch die Aufnahme von Wasser beobachtet worden [164, 186]. Im Bereich der Verbundzone ist zudem das Phänomen der Degradation des adhäsiven Verbundes zu beobachten [66]. Dieser Effekt kann durch verschiedene Methoden der Vorbehandlung des Dentins jedoch deutlich reduziert werden. Hierbei wird insbesondere eine Touchierung der Kavität mit Chlorhexidindiglukonat empfohlen, wodurch sich die Dicke der Adhäsivschicht deutlich langsamer reduziert [25]. Die Frage ist nun, ob nicht der Verschluss der Wurzelkanaleingangsbereiche nach erfolgter Obturation eine weitere Indikation zur Anwendung adhäsiver Systeme darstellt.

Abdichtungseffizienz

Nicht-adhäsive Materialien wie *Super-EBA*-Zement und Glasionomerezemente zeigten eine geringere Abdichtungseffizienz verglichen mit den hohen Dichtigkeitswerten adhäsiver und fließfähiger Materialien, wie zum Beispiel *Panavia* oder *Clearfil* (Shindo et al. 2004). Die Resultate zeigten also deutliche Vorteile in der Mikroleakageprävention bei der Verwendung von adhäsiven und fließfähigen Füllungswerkstoffen [163]. Allerdings wurden in einer anderen Studie auch deutlich höhere Dichtigkeitsergebnisse für Glasionomerezemente im Vergleich zu Kompositen beobachtet [173].

Galvan et al. (2002) untersuchten verschiedene adhäsive Systeme und *IRM* auf ihre koronalen Sealerqualitäten und kamen zu dem Ergebnis, dass alle Adhäsivsysteme nach ein bis drei Monaten signifikant bessere Resultate in Bezug auf den Betrag der

koronalen Mikroleakage lieferten als *IRM*, welches eine extensive Leakage zuließ. Ein selbsthärtendes Dentinbondingsystem erreichte die beste Abdichtung [64]. Adhäsive Füllungsmaterialien konnten als koronale Verschlussmaterialien gute Dichtigkeitsergebnisse erzielen und zeigten signifikant geringere Leakage als etwa bei dem ebenfalls getesteten Material *IRM* [16]. Eine *In-vitro*-Studie zur Abdichtungseffizienz fünf verschiedener Dentinadhäsive im Bereich der Pulpa-kammer menschlicher Molaren mittels der *Fluid-Filtrations-Tests* (Öztürk *et al.*) zeigte im Gegensatz zu vorhergehenden Studien [16], dass kein einziges System Flüssigkeitspenetration entlang des gebondeten Interfaces vollständig verhindern konnte. Es waren *Mikrogaps* vorhanden, deren Entstehung Öztürk *et al.* auf die starke Polymerisationsschrumpfung des jeweils 2 mm dicken adhäsiven Verschlusses zurückführte [132]. Eine andere These für das Auftreten derartiger Spalten ist eine nicht vollständige Penetration des demineralisierten Dentins mit Kunststoffmonomeren und eine unvollständige Infiltration des freiliegenden Kollagennetzwerkes [132].

4.9 Einflussfaktoren für die Qualität des Systems Wurzelkanalfüllung und koronaler Verschluss

4.9.1 Bearbeitung des Dentins

Hosoya et al. (2004) untersuchten den Einfluss der Diamantenkörnung von rotierenden Schleifkörpern auf den Haftverbund von adhäsiven Füllmaterialien [77]. Dabei konnte gezeigt werden, dass glattere Dentinoberflächen (25 µm) zu einer signifikant höheren Scherfestigkeit führen, als dies bei der Präparation mit groberen Diamantschleifern (50 µm und mehr) der Fall war. Eine Ursache hierfür wurde jedoch nicht diskutiert.

4.9.2 Schmierschicht

Während der Wurzelkanalbehandlung sowie bei der koronalen Restauration soll durch die Entfernung der Schmierschicht ein möglicher negativer Einfluss auf die Wandständigkeit der Wurzelkanalfüllung oder Restauration verhindert werden [90, 116]. Der Grund hierfür liegt darin, dass es sich bei der Schmierschicht nicht um eine inerte und dauerhaft stabile Schicht handelt, welche eine zuverlässige

Abdichtung gegenüber Flüssigkeiten und Bakterien aus dem Mundhöhlenmilieu ermöglicht [116]. Im Rahmen der endodontischen Therapie ist der Einfluss der Schmierschicht in zweierlei Hinsicht von Nachteil. Zum einen verhindert sie die Desinfektion von Dentintubuli durch medikamentöse Einlagen [13], zum anderen die Penetration der Wurzelkanalfüllpaste in die Tubuli [188]. Folglich bildet der *Smear layer* im Rahmen der Obturation eine Isolierschicht, welche einen direkten Kontakt der Wurzelkanalfüllung zum Dentin unterbindet [67, 90]. Als besonderer Nachteil wird hier angesehen, dass die instabile und lösliche Schmierschicht durch bakterielle Aktivität degradiert werden kann und in der Folge einen Hohlraum hinterlässt [90, 188]. Im Rahmen von Dichtigkeitsuntersuchungen konnte allerdings gezeigt werden, dass der negative Effekt der Schmierschicht auf die Dichtigkeit der Wurzelkanalfüllung vom Sealmaterial und der Obturationstechnik abhängig ist und nicht notwendigerweise zu einer Erhöhung der Mikroleakage führt [181, 184]. Allerdings resultiert eine bessere Haftung des Sealers an der Kanalwand nach Entfernung der Schmierschicht vom Wurzelkanaldentin. Im Rahmen der koronalen Restauration wurden verschiedene Methoden entwickelt, welche die Schmierschicht beließen und nutzbar machten oder vollständig entfernten [90, 154]. Ebenso resultiert auch in Anwesenheit des *Smear layers* eine Reduktion der Haftkraft des Komposites zum Dentin, da vor allem die Interaktion mit dem intertubulären Dentin beeinträchtigt wird [72]. Die Entfernung der Schmierschicht erhöht in der Folge signifikant den Haftverbund zum Dentin [99]. Diese Beobachtungen lassen keinen Zweifel daran, dass die Schmierschicht vor den Versiegelungen unbedingt entfernt werden sollte. Bei der Anwendung der heutigen Adhäsivtechnik mittels *Total-Etch* wird die Schmierschicht in der koronalen Kavität jedoch vollständig entfernt [137].

Die Verhältnisse sind bei Dentin, das mit einem *Smear layer* bedeckt ist, anders gelagert. Man kann eine Kruste von Rückständen auf der darunterliegenden Dentinmatrix beobachten, so dass keine Tubulieingänge ausgemacht werden können, da sie durch sogenannte *Smear plugs* verstopft sind [136]. Nach einer Ätzung werden die Eingänge sichtbar. Das Ätzen mit Phosphorsäure ist ein probates Mittel um den *Smear layer*, die *Smear plugs* und das peritubuläre Dentin zu entfernen, eine Demineralisationstiefe von 5 - 7 µm zu erreichen und dadurch das Kollagennetzwerk zu demaskieren [137]. Laut *Pashley et al.* ist säuregeätztes und danach nicht luftgetrocknetes Dentin ein ideales Substrat für Adhäsive, da die Dentinmatrix gut infiltriert werden kann [138]. Sie beobachteten nämlich, dass sich im etablierten Kollagennetzwerk ein umschriebener Kollaps der Fasern in der obersten, etwa 0,3 - 0,5 µm dicken Schicht nicht verhindern lässt, sodass hier

kondensierte Kollagenfasern vorliegen. Dies stellt leider ein Hindernis für eine maximale Infiltration der Dentinoberfläche durch die Bondingsysteme dar. Es konnte beobachtet werden, dass diese Schicht dicker ist, wenn das Dentin vorher mit einem *Smear layer* bedeckt war, da im Layer vorhandene Kollagentrümmernach der Ätzung diese Schicht verstärken [138]. Auch wenn eine Trocknung des Dentins nach der Ätzung stattfand, verstärkten sich die Kondensierungstendenzen im Kollagengeflecht. Um einen Kollaps mit den sich anschließenden Schwierigkeiten der schlechten Penetration zu vermeiden, empfahlen *Pashley et al.* (2007), auf eine Lufttrocknung des Dentins zu verzichten [138]. Um kollabierte Kollagenstrukturen wieder für die Kunststoffmoleküle maximal penetrationsfähig zu machen, besitzen heutige Dentinbondingsysteme amphiphile Moleküle wie etwa *HEMA* (Hydroxyethylmethacrylat), die ein Reexpandieren des Netzwerks ermöglichen [137]. Langfristig scheint *Moist bonding* zu einem stabileren Haftverbund zu führen als *Dry bonding* [110].

4.9.3 Spülung des Wurzelkanals

Die in der Endodontie verwendeten Spülflüssigkeiten kontaminieren zwangsläufig auch das koronale, orofiziale Dentin. Dabei zeigten diese verschiedenen Einflussfaktoren einen Effekt auf das Dentin im Wurzelkanal und in der Zugangskavität. Zum einen wurde der Einfluss auf die Mikrohärtigkeit des Dentins nachgewiesen. Natriumhypochlorit, Wasserstoffperoxid und Chlorhexidindigluconat reduzierten signifikant die Mikrohärtigkeit von Dentin [128]. Vergleichbare Effekte wurden auch für die Spülung mit *EDTA* und Zitronensäure (*MTAD*) beobachtet. Es zeigte sich, dass *EDTA* eine deutlich höhere Erosionstiefe erzeugte als Zitronensäure [153]. Keine Reduktion der Mikrohärtigkeit hingegen zeigte die Spülung mit 0,2%iger Chlorhexidindigluconat-Lösung [8]. Zum anderen wurden Beeinträchtigungen hinsichtlich des adhäsiven Verbunds zum Dentin beschrieben. Natriumhypochlorit, die primär in der Endodontie eingesetzte Spülflüssigkeit, zeigte einen negativen Effekt auf den Verbund von Komposit zu Dentin, wobei sich die Verbundfestigkeit signifikant reduzierte. Diesem Effekt kann durch die abschließende Verwendung von Natriumascorbat begegnet werden [61, 121]. Chlorhexidindigluconat zeigte dagegen einen für die Adhäsivtechnik durchaus positiven Effekt [29].

4.9.4 Medikamentöse Einlagen

Im Rahmen der endodontischen Therapie kann eine zweizeitige Behandlung erforderlich werden. Dabei erfolgt in der ersten Sitzung die chemomechanische Aufbereitung des Wurzelkanals und es wird ein Medikament zur Desinfektion des Wurzelkanalsystems in den Wurzelkanal eingebracht. Dieses dient der möglichst vollständigen Desinfektion des Wurzelkanalsystems [168]. In der folgenden Behandlung erfolgen die definitive Aufbereitung und die Obturation des Wurzelkanals. Als medikamentöse Einlage kommen Calciumhydroxidpaste und Chlorhexidindiglukonat-Gel zum Einsatz, wobei neuerdings zusätzlich beide Wirkstoffe auch als medikamentöse Stifte verfügbar sind [47, 103]. Neben dem gewünschten Effekt der Desinfektion haben medikamentöse Einlagen auch unerwünschte Effekte. Insbesondere Calciumhydroxid, welches als Paste in den Wurzelkanal eingebracht die Wurzelkanaloberfläche kontaminiert, führt zu einer Reduktion des Haftverbunds der Wurzelkanalfüllung zum Kanalwanddentin und beeinträchtigt daher möglicherweise auch den koronalen Verschluss [93]. Hierbei kann das lösliche Calciumhydroxid ebenso wie die Schmierschicht als Inhibitionsschicht fungieren, welche eine direkte Benetzung des Wurzelkanaldentins mit Sealer oder des Kavitätendentins mit dem Füllmaterial verhindert. Auch die Dichtigkeit verschiedener Sealer wurde durch Calciumhydroxid negativ beeinflusst [18]. Für Chlorhexidindiglukonat konnten solche negativen Effekte in dieser Ausprägung nicht beobachtet werden [96]. Die medikamentösen Stifteinlagen zeigen ebenfalls geringere Effekte [68].

4.9.5 Trocknung des Wurzelkanals

Die korrekte Trocknung sowohl des Wurzelkanaldentins als auch des Kavitätendentins vor dem Legen der Wurzelkanalfüllung oder koronalen Füllung stellt einen wichtigen Einflussfaktor für die Qualität und den Erfolg der Restauration dar. So konnte gezeigt werden, dass Wurzelkanalsealer unterschiedlich auf feuchte und trockene Verhältnisse reagieren und variable Dichtigkeitsergebnisse aufwiesen [151]. Ein ebenso starker Einfluss kann beim Legen der koronalen Restauration beobachtet werden. Hier stellt sich das Problem jedoch anders dar. Bedingt durch die zumeist adhäsiv erfolgende Restauration kommen Dentinadhäsive zum Einsatz, welche unterschiedlich empfindlich auf die Feuchtigkeit oder Trockenheit in der Kavität reagieren. Der Haftverbund von Füllungsmaterialien zum Dentin kann durch

nicht sachgerechte Verarbeitung im Rahmen von Handlingfehlern negativ beeinflusst werden [61]. So stellen exzessives Trocknen oder die eine unvollständige Entfernung überschüssigen Dentinadhäsivs aus der Kavität typische Fehlerquellen bei der Durchführung des *Wet bondings* dar [60]. Ferner verhindert die Trocknung von geätztem Dentin (*Dry bonding*) eine optimale Infiltration des demineralisierten Kollagengeflechts [125].

4.9.6 Antibakterielle Effekte

Frisch angemischte Wurzelkanalsealer zeigen gegenüber verschiedenen Keimen höchst unterschiedliche und verschieden stark ausgeprägte Hemmwirkung [31, 200]. Auspolymerisierte und gelagerte Wurzelkanalsealer hingegen zeigten eine deutlich reduzierte bis nicht vorhandene antibakterielle Wirkung, wobei teilweise keine Hemmwirkung mehr feststellbar war [39, 63]. Adhäsivsysteme zeigen abhängig von ihrer Komposition initiale antibakterielle bis bakterizide Wirkung, welche nachfolgend diese Effekte nicht mehr aufweisen. Auspolymerisiertes Komposit zeigte ebenfalls keine antibakterielle Wirkung mehr [114]. Auch Glasionomierzement zeigt hinsichtlich dessen nur einen geringe antibakteriellen Effekt [105].

5 Problemstellung

Ziel dieser Studie war es, den Einfluss verschiedener Restaurationswerkstoffe auf den Verschluss im Bereich der Kanaleingänge nach erfolgter Wurzelkanalfüllung zu untersuchen. So wurde in der vorliegenden *In-vitro*-Studie die Dichtigkeit von Wurzelkanalfüllungen anhand eines Bakterienpenetrationstests evaluiert. Dabei sollte gezeigt werden, welches Verschlussmaterial die beste Abdichtungseffizienz aufweist. Anhand der Ergebnisse dieser Dichtigkeitsanalyse sollte eine möglichst effektive Technik zum langfristig bakteriendichten Verschluss des Wurzelkanalsystems aufgezeigt werden. Dabei sollte zudem demonstriert werden, welchen Einfluss das Dentinadhäsiv sowie das fließfähige Komposit auf die Ergebnisse haben.

6 Material und Methoden

6.1 Übersicht und Arbeitsschritte

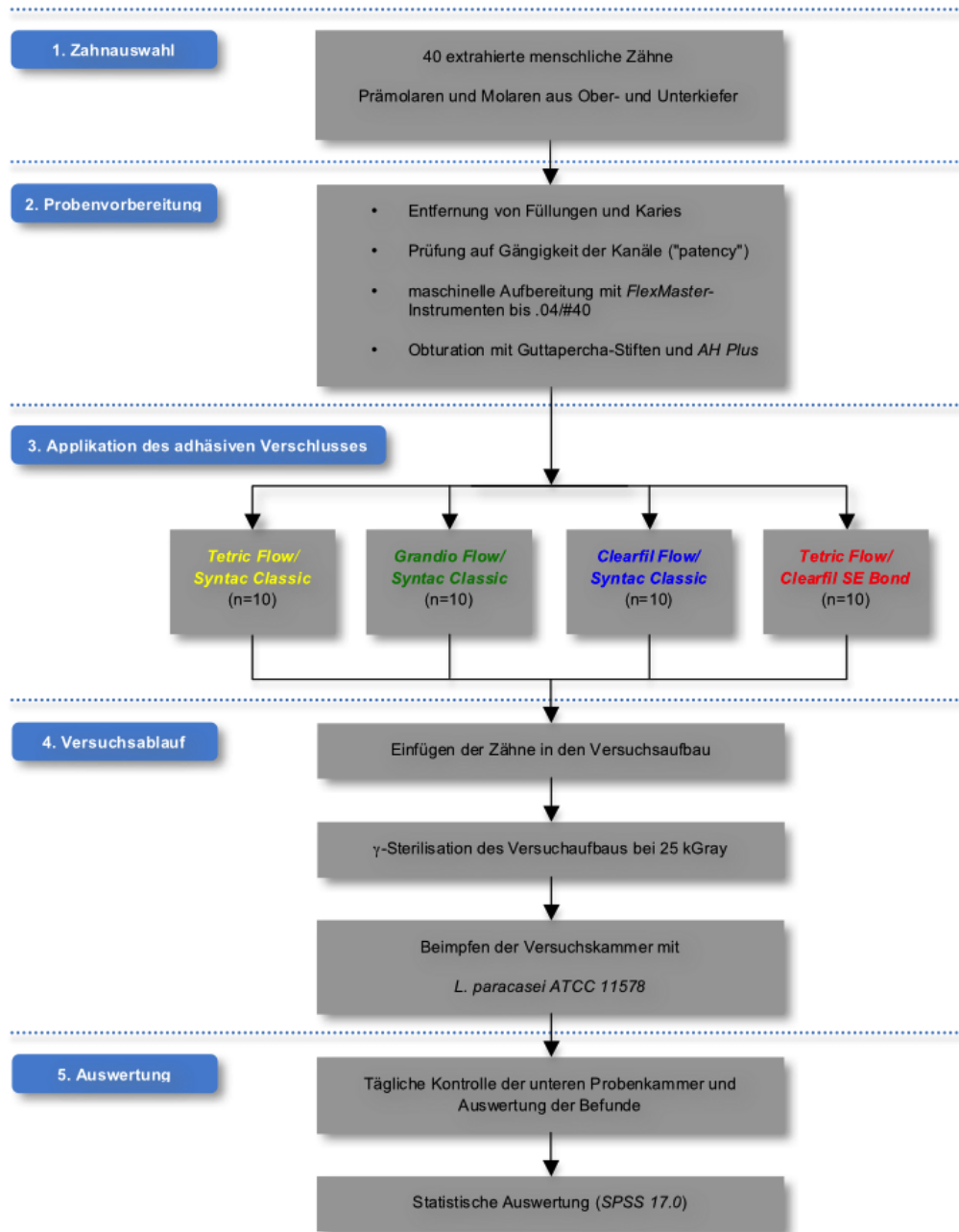


Abb. 1: Fließdiagramm über die Materialgruppen und Arbeitsschritte dieser Bakterienpenetrationsanalyse

6.2 Die Herstellung der einzelnen Testexemplare

Für diese Studie wurden 40 extrahierte menschliche Molaren benötigt. Es wurden erste, zweite und dritte Molaren sowohl aus dem Oberkiefer als auch aus dem Unterkiefer verwendet. Diese Exemplare waren kariös, nicht kariös oder gefüllt und hatten ein abgeschlossenes Wurzelwachstum. Direkt nach der Extraktion wurden sie in 0,5%iger *Chloramin-T*-Lösung (Merck Eurolab, Darmstadt) bei Zimmertemperatur aufbewahrt, wobei eine Lagerungsdauer von acht Wochen bis zum Versuchsbeginn nicht überschritten wurde.

6.2.1 Die Vorbehandlungen bis zum adhäsiven Verschluss des Wurzelkanalsystems

Zuerst wurden die Zähne von noch anhaftendem Desmodont und vorhandenem Zahnstein bzw. Konkrementen mit einem Scaler (Hu-Friedy, Leimen) gereinigt. Anschließend wurden die Zähne mit rotem Winkelstück (*KaVo*, Biberach) und Diamantschleifkörper (Hager & Meisinger, Neuss) unter Wasserkühlung trepaniert, noch eventuell vorhandene Füllungen wurden entfernt und übersichtliche Kavitäten angelegt. Vorhandene kariöse Zahnhartsubstanz wurde mit grünem Winkelstück (*KaVo*) und Rosenbohrer (Hager & Meisinger) exkaviert. Im Anschluss daran erfolgte die chemomechanische Aufbereitung der Wurzelkanalsysteme. Nach Exstirpation des Pulpagewebes wurden zunächst alle Kanäle mit Stahlfeilen (Dentsply Maillefer, Ballaigues, Schweiz) bis 1 mm vor Apex bis ISO-Größe 10 auf Gängigkeit überprüft. Danach erfolgte die maschinelle Aufbereitung der Wurzelkanäle mit *FlexMaster*-Instrumenten (VDW, München) bis zur definitiven Aufbereitungsgröße von Größe 40 Taper .04. Die Aufbereitungsgröße wurde mit einem *Verifier* (Dentsply Maillefer) derselben Größe kontrolliert. Währenddessen wurden eine Wechselfspülung mit 5%igem Natriumhypochlorit (Apotheke des Universitätsklinikums Erlangen) und 40%iger Zitronensäure (Apotheke des Universitätsklinikums Erlangen) mit Hilfe von speziellen Endo-Spülkanülen (*Buquet*, Vedefar, Dilbeek, Belgien) durchgeführt. Abschließend erfolgte eine ausgiebige Spülung mit 70%igem Ethanol (Apotheke des Universitätsklinikums Erlangen).

Die 40 Probenzähne wurden nun vor dem Abfüllen der Wurzelkanäle auf vier Gruppen mit je 10 Zähnen randomisiert aufgeteilt und wieder in *Chloramin-T*-Lösung eingelagert. Bevor in den einzelnen Gruppen die adhäsive Versiegelung der

Wurzelkanaleingänge und des Pulpakammerbodens vorgenommen wurde, wurden alle Wurzelkanäle mit dem gleichen Material und der gleichen Technik gefüllt. Als Wurzelkanalfüllung diente Guttapercha (s. Abb. 2) mit *AH Plus* als Sealer (s. Abb. 3).

Nachfolgend sind die für die Obturation der Wurzelkanäle eingesetzten Materialien und deren Inhaltsstoffe aufgeführt.

Guttapercha Top Color (Coltène Endo):

→ Guttapercha

→ Bariumsulfat

→ Zinkoxide

→ Farbstoffe



Abb. 2: Für die Obturation der Wurzelkanäle eingesetzte *Guttapercha Top Color*-Stifte (Coltène Endo)

AH Plus Root Canal Sealer (Dentsply DeTrey):

Paste 1:	→ Epoxidharze	Paste 2:	→ Amine
	→ Calciumwolframat		→ Calciumwolframat
	→ Aerosil		→ Aerosil
	→ Eisenoxid		→ Silikonöl



Abb. 3: Zweikomponenten-Epoxidharzsealer *AH Plus* mit Basis- und Katalysatorpaste

Vor der Obturation wurden die Wurzelkanäle wiederum mit Alkohol gespült und mit Papierspitzen der ISO-Größe 55 (Coltène Endo) getrocknet. Daraufhin wurde *AH Plus* nach Herstellerangaben vorbereitet und mit Papierspitzen der gleichen Größe pumpend in jedes aufbereitete Kanalsystem eingebracht. Je ein Guttaperchastift ISO 55 wurde bei runden Kanallumina nach der Zentralstifttechnik eingebracht. Bei einigen ovalen Wurzelkanalanatomien wurden zusätzlich Stifte ISO 25 eingeführt und mit einem Finger-Spreader (Dentsply Maillefer) lateral kompaktiert. Koronal überstehende Guttapercha wurde mit einem erwärmten Kugelpfropfer auf Höhe des Kanaleingangsbereiches abgetrennt, koronal nachkondensiert und die Kavität mit einem alkoholgetränktem Schaumstoffpellet (VOCO) gereinigt, bis klinisch keine Sealer-Rückstände mehr auszumachen waren.

6.2.2 Die intrakoronaren adhäsiven Verschlüsse der Kanaleingangsbereiche und die Versiegelung des Pulpakammerbodens

Als Materialien zur Herstellung des adhäsiven Verschlusses fanden *Syntac Classic* als Dentinbondingagent (Abb. 4) in Verbindung mit den Kompositen *Tetric Flow* (Abb. 5), *Grandio Flow* (Abb. 6) und *Clearfil Flow* (Abb. 7), sowie *Clearfil SE Bond* (Abb. 8) in Verbindung mit dem Komposit *Tetric Flow* Anwendung.

Nachfolgend sind die für den koronalen Verschluss eingesetzten Materialien und deren Inhaltsstoffe aufgeführt.

Syntac Classic (Ivoclar Vivadent):

1. Primer:	2. Adhesive:	3. Heliobond:
→ Maleinsäure	→ PEGDMA	→ Bis-GMA
→ TEGDMA	→ Glutaraldehyd	→ DMA
→ Wasser	→ Wasser	→ TEGDMA
→ Aceton		



Abb. 4: Komponenten des *Syntac Classic* Mehrschritt-Dentin-Bonding-Systems

Tetric Flow (Ivoclar Vivadent)

- Bis-GMA
- UDMA
- TEGDMA
- Bariumglasfüller silanisiert
- Ytterbiumtrifluorid
- Mischoxide
- Ba-Al-Fluorosilikatglas silanisiert
- hochdisperses Siliziumdioxid
- Additive
- Katalysatoren und Stabilisatoren
- Pigmente



Abb. 5: *Tetric Flow* in der *Cavifil*-Applikationsform

Grandio Flow (VOCO):

- Bis-GMA
- TEGDMA
- HEDMA



Abb. 6: *Grandio Flow* in der Spritzenapplikationsform

Clearfil Flow (Kuraray):

- Barium-Glaspulver
- Kolloidales Siliziumoxid
- Triethyleneglycol-Dimethacrylat (TEGDMA)
- Hydrophobes aromatisches Dimethylacrylat
- d-Campherchinon



Abb. 7: *Clearfil Flow* in der Spritzenapplikationsform

Clearfil SE Bond (Kuraray):

1. Primer:

- 10-Methacrylat-oxydecyl
Dehydrogenphosphat (MDP)
- 2-Hydroxyethyl Methacrylat
(HEMA)
- Hydrophiles Dimethacrylat
- dl-Campherchinon
- N,N-Diethanol-p-Toluidin
- Wasser

2. Bond:

- 10-Methacrylat-oxydecyl
Dehydrogenphosphat (MDP)
- Bisphenol-A-Diglycytat-Methacrylat
(Bis-GMA)
- 2-Hydroxyethyl Methacrylat (HEMA)
- Hydrophiles Dimethacrylat
- dl-Campherchinon
- N,N-Diethanol-p-Toluidin
- Kolloides Siliziumoxid



Abb. 8: Komponenten des *Clearfil SE Bond* Dentin-Bonding-Systems

6.3 Auswahl und Herstellung der Bakterienkultur

Für diese Studie wurde der *Lactobacillus paracasei* ATCC 11578 als Versuchskeim ausgewählt, da hiervon zum einen keine Gefahr für die arbeitende Person ausgeht und zum anderen der Keim nicht zuletzt in der natürlichen Flora der Mundhöhle des Menschen vorzufinden ist und somit als repräsentativ bewertet werden kann. *Laktobazillen* sind zudem regelmäßig bei endodontischen Infektionen im Wurzelkanal und auch periapikal nachweisbar. *Lactobacillus paracasei* ist leicht anzüchtbar, stellt keine besonderen Anforderungen an das Nährmedium und kann dadurch auch bis zu 5 Tage ohne Erneuerung der Nährstoffe überleben. Er erfordert bei der Verarbeitung keine erhöhten Sicherheitsvorkehrungen. Dieser Keim lässt sich leicht nachweisen und auch im Mikroskop begutachten. *Lactobacillus paracasei* ist ein fakultativ anaerobes grampositives Stäbchen, welches keine Sporen bildet. Als Nährmedium wurde ein steriles *Schaedler-Bouillon* verwendet. Ein Teil dieses klaren Bouillons wurde unter sterilen Bedingungen mit Kolonien des *Lactobacillus paracasei* ATCC 11578 beimpft. Nach zweitägiger Inkubation bei 37°C wurde eine starke Trübung der Nährlösung beobachtet, was auf eine Vermehrung der Bakterien schließen ließ. Das Ausstreichen der infizierten Lösung auf einem Objektträger

zeigte unter mikroskopischer Betrachtung das für diesen Keim typische Bild. Es waren nicht motile Stäbchen unterschiedlicher Größe zu sehen. Eine Sporenbildung war nicht festzustellen. Eine Gramfärbung ließ die Bakterien wie erwartet dunkelblau erscheinen, wodurch diese als grampositive Bakterien identifiziert werden konnten.

6.4 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau bestand aus einer oberen und einer unteren Kammer. Für die obere Kammer wurden verschließbare 15 ml Zentrifugenröhrchen aus Polyethylen (Fa. Sarstedt, Nümbrecht) benutzt. Als untere Kammer wurden 50 ml *Falcon-Tubes* (Fa. Becton & Dickinson, Franklin Lakes, USA) verwendet. Die Polyethylenröhrchen der oberen Kammer wurden an der Spitze mit einer Trennscheibe bearbeitet und so um ca. 5 mm gekürzt. In diese Öffnung wurden die Probenzähne mit Abdichtharz (Fa. Metaflux Techno Service GmbH, Bielefeld) befestigt. Die Befestigungsfugen wurden zusätzlich mit Klebewachs hermetisch versiegelt. Der koronale Anteil und die apikalen 1 - 2 mm der Probenzähne wurden dabei nicht versiegelt. In den Deckel der größeren *Falcon-Tubes* wurde mittels eines Schälbohrers eine dem 15 ml Zentrifugenröhrchen entsprechende große Öffnung angelegt. Durch diese Öffnung wurde das Zentrifugenröhrchen soweit hineingeschoben, bis der apikale Teil der Probenzähne die 10 ml-Markierung des *Falcon-Tubes* erreicht hat. Alle entstehenden Fugen wurden wieder mit Abdichteharz und Klebewachs versiegelt, so dass ein hermetisch geschlossenes System entstand. Die Versiegelung mit Klebewachs geht aus einer Untersuchung von *Jacobsen et al.* im Vergleich mit Epoxidharz, Gießharz (Kunststoff) und Nagellack als die beste Methode hervor [82]. Die Abbildungen 9 und 10 zeigen nachfolgend den Versuchsaufbau.



Abb. 9: Eingebaute Probenzähne im befüllten Zweikammersystem

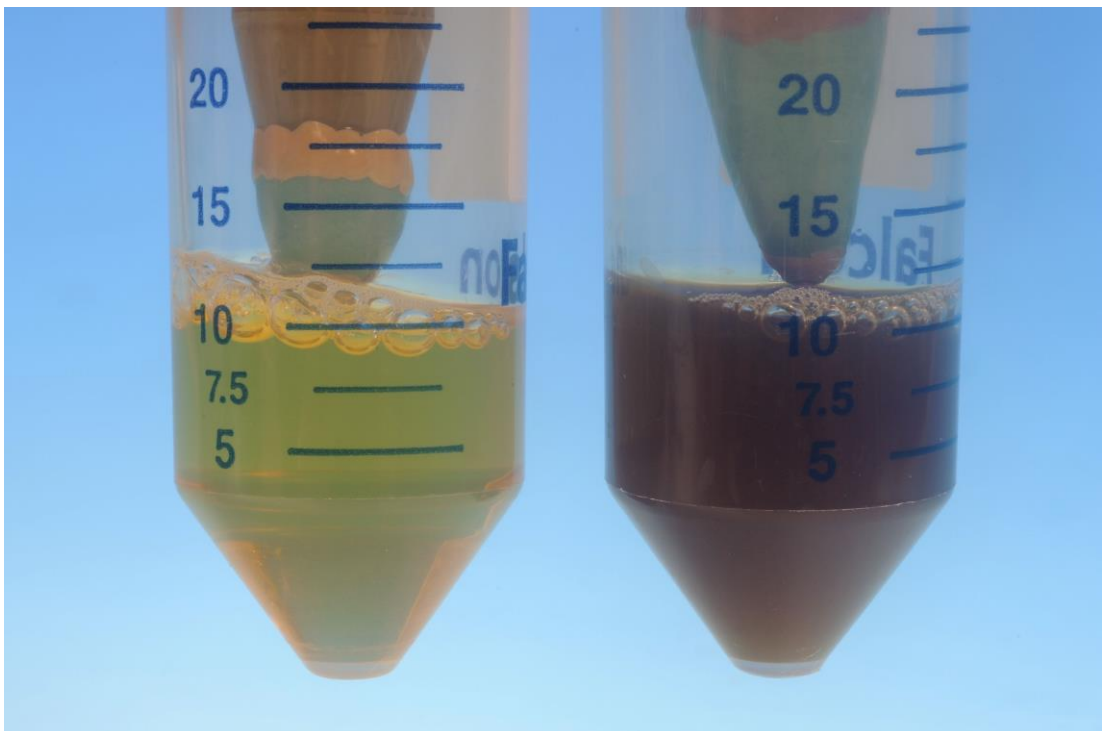


Abb. 10: Links ungetrübtes Nährmedium, rechts Trübung nach Bakterienpenetration in der unteren Probenkammer

6.5 Sterilisation der Probenkammern

Um den geschlossenen Versuchsaufbau komplett zu sterilisieren ohne den darin befindlichen Zahn zu zerstören, kam nur die Sterilisation mittels γ -Strahlung in Frage. So wurden obere und untere Kammern des Versuchsaufbaus mit steriler Kochsalzlösung gefüllt, damit die Probenzähne während Transport und Sterilisation nicht austrocknen, und zur Sterilisation in einem Gammasterilisator geschickt. Die Strahlendosis lag bei 25 kGray. Weitere *Falcon*-Röhrchen (für die untere Kammer) wurden mit *Schaedler*-Bouillon befüllt und im Autoklaven des Werkstoffwissenschaftlichen Labors der Zahnklinik 1 der Universität Erlangen sterilisiert. Vor Versuchsbeginn wurden unter einem sterilen Laminar-Flow die unteren Kammern, die zur γ -Sterilisation mitgeschickt waren, entfernt und durch die mit *Schaedler*-Lösung befüllten, autoklavierten *Falcon-Tubes* ersetzt. Dabei wurde sorgfältig darauf geachtet, den Versuchsaufbau nicht zu kontaminieren. Die Kochsalzlösung aus den oberen Kammern wurde abpipettiert.

6.6 Durchführung des Bakterienpenetrationstests

Ab Untersuchungsbeginn wurden alle Versuchskammern nach Zugabe von 10 ml der mit *Lactobacillus paracasei* infizierten Nährlösung bei 37°C in einem Brutschrank inkubiert. Alle unteren Kammern wurden täglich auf Eintrübung des Nährmediums hin überprüft, da dies ein Hinweis auf bakterielles Wachstum darstellt. War eine Trübung festzustellen, wurde der Tag der Trübung mit der entsprechenden Probennummer notiert. Aus der unteren Kammer wurde dann Flüssigkeit entnommen, diese in *Schaedler-Bouillon* bebrütet und die Identität des Versuchskeims mikroskopisch ausgewertet sowie eine Gramfärbung durchgeführt. Die Bakteriensuspension der oberen Kammern wurde an jedem fünften Tag unter dem Laminar-Flow entfernt und neu eingefüllt, um die Vitalität der Keime sicherzustellen.

6.7 Statistische Auswertung

Die Werte für die Penetrationszeiten wurden mittels SPSS 17.0 für Windows statistisch berechnet. Dazu wurden die Mittelwerte (MW) und Standardabweichungen (SD) der Penetrationszeiten innerhalb der Gruppen mittels

Kolmogorov-Smirnov-Test (KS) auf Normalverteilung hin überprüft. Die nachfolgend durchgeführte Berechnung mittels univariater Analyse auf Varianzen (*ANOVA*) diente der Analyse des Einflusses des Adhäsivsystems sowie des verwendeten Flowable-Komposits auf die Penetrationszeit. Ein anschließender *Post-hoc*-Test nach *Student-Newman-Keuls (SNK)* sollte mögliche Signifikanzen zwischen den Verschlussmaterialien aufzeigen. Abschließend erfolgte eine Auswertung mittels *Levene-Tests* der Varianzgleichheit sowie *T-Tests* für die Mittelwertgleichheit.

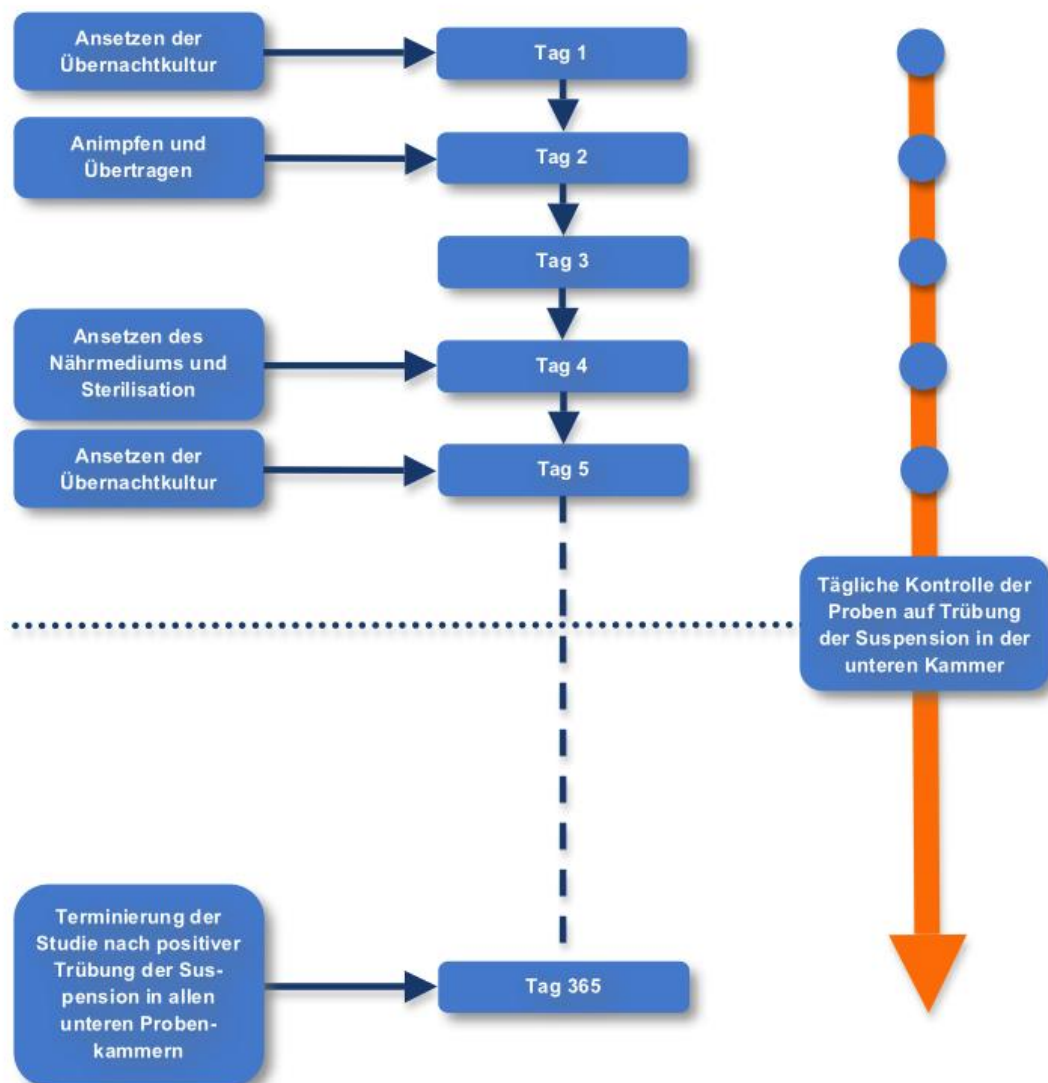


Abb. 11: Zeitlicher Ablauf der Laborarbeiten (regelmäßige Wiederholung alle 5 Tage bis zur Terminierung der Studie)

7 Ergebnisse

Nachfolgend sind die Ergebnisse bis zum Eintritt der Trübung (Tage) der unteren Kammer aufgeführt (Tab. 3). Dabei war auffällig, dass hinsichtlich der Penetrationszeit eine sehr hohe Standardabweichung auftrat. Hinsichtlich der Medianwerte für die Penetrationszeit zeigten *Tetric Flow* und *Grandio Flow* in Kombination mit *Syntac Classic* die beste Resistenz gegen bakterielle Penetration der unteren Kammer, *Clearfil Flow* mit demselben Adhäsivsystem hingegen die schlechteste (Abb. 12).

Gruppe	Komposit	Adhäsiv	MW (Tage)	SD (Tage)	p-Wert (KS-Test)
1	<i>Tetric Flow</i>	<i>Syntac Classic</i>	147,3	123,6	0,861
2	<i>Grandio Flow</i>	<i>Syntac Classic</i>	142,7	113,2	0,972
3	<i>Clearfil Flow</i>	<i>Syntac Classic</i>	75,7	67,3	0,740
4	<i>Tetric Flow</i>	<i>Clearfil SE Bond</i>	96,3	146,4	0,221

Tab. 3: Ergebnisse der Mittelwerte und Standardabweichungen der Penetrationszeiten in den 4 experimentellen Gruppen

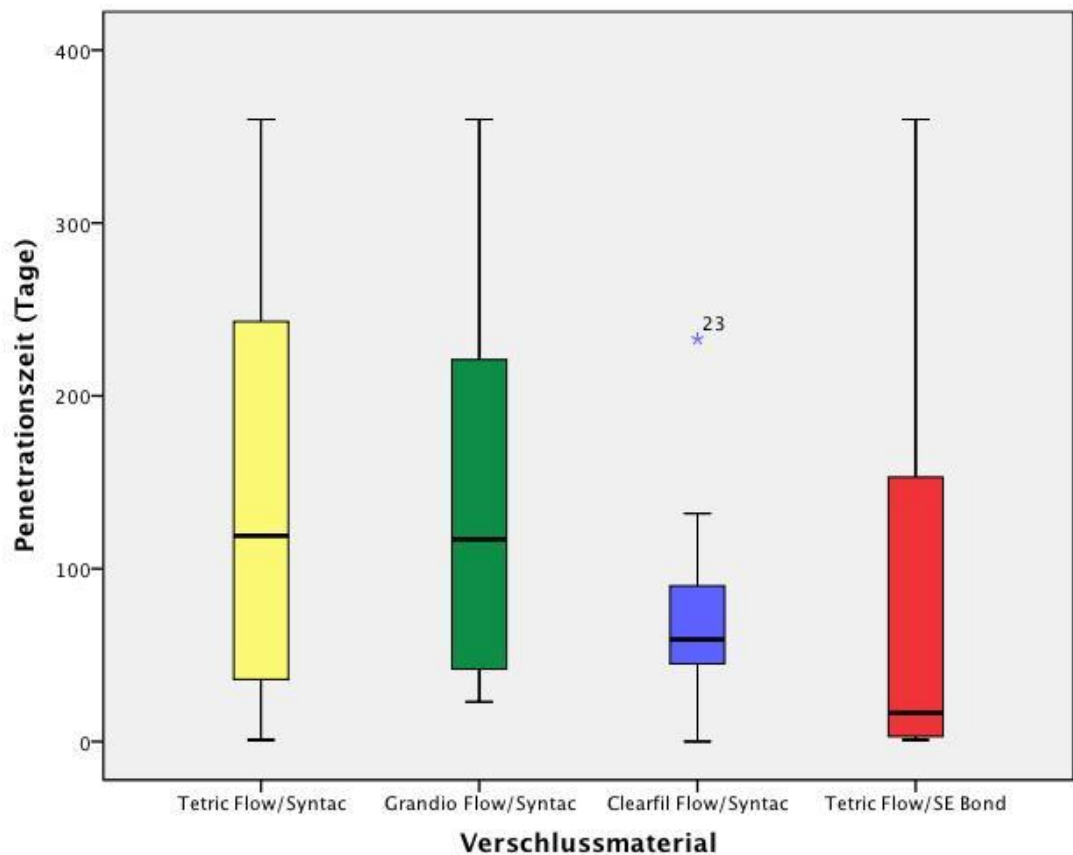


Abb. 12: Die grafische Darstellung (Boxplot) der ermittelten Penetrationszeiten der 4 experimentellen Gruppen zeigt eine längere Resistenz gegen bakterielle Kontamination der unteren Probenkammer nach koronalem Verschluss mittels *Tetric Flow* und *Grandio Flow*.

Die statistische Auswertung mittels univariater ANOVA ergab keine signifikanten Einfluss des Adhäsiv-Systems ($p=0,333$) und des Verschlussmaterials ($p=0,316$) auf die Penetrationszeit.

Der nachfolgend durchgeführte *Post-hoc*-Test ergab keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der Penetrationszeit zwischen den verschiedenen Kompositen (*SNK-Test*; $p=0,345$).

Eine abschließende Auswertung mittels *Levene*-Test ergab lediglich signifikante Unterschiede hinsichtlich der Varianzgleichheit der Penetrationszeiten zwischen den Gruppen 1 und 3 sowie zwischen den Gruppen 3 und 4 (Tab. 4).

Die statistische Auswertung mittels *T*-Tests ergab keinerlei signifikante Unterschiede hinsichtlich der Penetrationszeiten zwischen den einzelnen Gruppen (Tab. 4).

Gruppe	1	2	3	4	p-Werte (<i>Levene</i> -Tests)
1		0,749	0,049*	0,604	
2	0,932		0,085	0,417	
3	0,125	0,125		0,026*	
4	0,411	0,438	0,691		
p-Werte (<i>T</i> -Tests)					

Tab. 4: Statistik-Werte zur Varianzgleichheit (*Levene*-Test) und Mittelwertgleichheit (*T*-Test) der Penetrationszeiten der verschiedenen Gruppenpaare.

8 Diskussion

8.1 Diskussion der Methodik

8.1.1 Auswahl des Zahnsubstrats

Neben der Möglichkeit menschliche Zähne für Studienzwecke zu verwenden, können auch tierische Zähne, insbesondere Rinderzähne, eingesetzt werden. Natürliche Zähne haben den unüberbietbaren Vorteil, dass sie die klinische Situation aufgrund ihrer anatomischen Struktur, etwa durch die Präsenz von Dentintubuli, ideal darstellen, was derzeit mit künstlichen Modellen noch nicht möglich ist. Aufgrund der schlechten Verfügbarkeit humanen Zahnmaterials kommen teilweise auch tierische Zähne zum Einsatz, die weniger Limitationen hinsichtlich der Beschaffungsmöglichkeiten unterliegen. Allerdings sollte nicht außer Acht gelassen werden, dass auch Unterschiede des Zahnsubstrats zu konträren Ergebnissen führen können. Daher wurde in dieser Studie humanes Zahngut eingesetzt, um eine bestmögliche Korrelation der untersuchten Materialien zu erzielen.

8.1.2 Wurzelkanalaufbereitung

Eine standardisierte Wurzelkanalaufbereitung dient dazu, die Variabilität der Kanalgeometrie möglichst gut zu minimieren. Maschinelle, voll rotierende Wurzelkanalinstrumente erzielen durch ihre gute Zentrierung und homogene Konizität einen gut ausgeformten, einfach zu obturierenden Wurzelkanal [120]. Dabei können Aufbereitungsfehler weitgehend minimiert werden und Unregelmäßigkeiten an der Wurzelkanaloberfläche sehr gut verhindert werden [84]. Daher wurden in dieser Studie alle Wurzelkanäle mittels *FlexMaster*-Instrumenten aufbereitet, wobei eine 4-prozentige Konizität sowie eine apikale Größe von #40 eine effektive Aufbereitungsgröße darstellt.

8.1.3 Spülprotokolle

Im Rahmen der endodontischen Therapie wird als wichtigste Spüllösung Natriumhypochlorit (NaOCl) eingesetzt, da es aufgrund seiner bakteriziden

Eigenschaften in der Lage ist, die Keimzahl im Wurzelkanalsystem signifikant zu reduzieren [199]. Ferner ermöglicht es eine Auflösung von vitalem und nekrotischem Gewebe [1, 73]. Die Konzentration ist für den Erfolg zwar weniger von Bedeutung als das Spülvolumen sowie die Spüldauer, als auch die effektive Kontaktzeit [107]. Dennoch wurde in dieser Studie 5-prozentiges Natriumhypochlorit eingesetzt.

Zur Entfernung der durch die Instrumentierung des Wurzelkanals entstandenen Schmierschicht (*smear layer*) eignen sich Chelatoren wie Ethylendiamintetraessigsäure oder andere Säuren wie beispielsweise Zitronensäure [109, 143, 149]. Im Rahmen dieser Studie wurde 40-prozentige Zitronensäure eingesetzt, da diese eine effektive und rasche Entfernung der Schmierschicht ermöglicht [149]. Zudem besitzt Zitronensäure einen guten antibakteriellen Effekt und kann zudem den Haftverbund von Füllungsmaterialien verbessern [155].

Als Abschluss-Spülungen kommen zumeist Chlorhexidindiglukonat oder Alkohol zum Einsatz. Chlorhexidindiglukonat erreicht ein breites Bakterienspektrum und ist zudem in der Lage, den Problemkeim *Enterococcus faecalis* effektiv zu eliminieren [180]. Vor Wurzelkanalfüllungen empfiehlt sich jedoch eine Spülung mittel Alkoholspülung, da hiermit der Liquor aus den Dentintubuli oberflächlich entfernt wird und somit die Gefahr der Feuchtigkeitskontamination des Dentins während des Sealer placements und mögliche Undichtigkeiten deutlich gesenkt werden [141, 151].

8.1.4 Wurzelkanalfüllung

Die laterale Kondensation von Guttapercha gilt als Standard-Technik und wird folglich an den meisten deutschen Universitäten gelehrt [85]. Diese Technik eignet sich für zahlreiche Wurzelkanalformen, wobei das vorhandene Wurzelkanallumen jeweils individuell mit einem möglichst hohen Anteil an Guttapercha obturiert wird. Der Sealer-Anteil kann im Gegenzug möglichst klein gehalten werden. Größere Sealerschichtstärken können eventuell zu höheren Undichtigkeiten führen [36, 86]. *AH Plus*, ein moderner Wurzelkanalsealer auf Epoxidharz-Basis, gilt aufgrund seiner Materialeigenschaften als Goldstandard [89, 151]. So zeigt *AH Plus* die geringste Löslichkeit aller Wurzelkanalfüllpasten und im Gegensatz zu anderen Sealern keine Schrumpfung, sondern eine lineare Expansion von initial 0,9%, später 1,2% infolge von Feuchtigkeitsaufnahme [131]. Daher wurde *AH Plus* im Rahmen dieser Studie in allen experimentellen Gruppen als Wurzelkanalsealer eingesetzt.

8.1.5 Füllungsmaterialien für den koronalen Verschluss

In dieser Studie wurden verschiedene fließfähige Komposite eingesetzt, welche in Kombination mittels zweier Adhäsivsysteme am Dentin befestigt wurden. Das bereits lange Zeit auf dem Markt verfügbare *Tetric Flow* wurde in Kombination mit dem langzeitbewährten *Syntac Classic* als Referenz-Material eingesetzt. Zudem wurden mit *Grandio Flow* und *Clearfil Flow* zwei moderne, auf Nano-Technologie basierende Flowables, untersucht. Zudem war es ein weiteres Ziel dieser Studie, zu untersuchen, ob unterschiedliche Adhäsivsysteme einen Einfluss auf die Dichtigkeit des koronalen Verschlusses haben. Dazu wurde neben *Syntac Classic* das selbst-adhäsive *Clearfil SE Bond* in Kombination mit vorheriger Phosphorsäureätzung eingesetzt.

8.1.6 Testverfahren zur Analyse der Abdichtungseigenschaften

Für die Untersuchung der Dichtigkeit von Wurzelkanalfüllungen und koronalen Verschlüssen wurde eine Vielzahl an Testverfahren entwickelt. Als die am einfachsten und schnellsten durchführbaren Analyseverfahren gelten Farbstoffpenetrationstests. Dabei wird der zu untersuchende Probenzahn in eine Farbstofflösung eingelegt. Anschließend erfolgt eine Farbstoffpenetration über einen längeren Zeitraum, meist 24 bis 72 Stunden (atmosphärischer Penetrationstest), alternativ unter Überdruck, etwa durch Zentrifugation (klassische Tests weisen hier G-Werte von 30 oder mehr auf) oder unter Vakuum-Bedingungen [7, 139, 151]. Als Farbstoffe kommen hier *Methylenblau*-Lösung, *Fuchsin*-Lösung oder Tusche (*India Ink*) zum Einsatz [26, 46]. Als Vorteil gelten hier insbesondere die schnelle und einfache sowie kostengünstige Durchführbarkeit [191]. Zudem erlauben die Farbstoffe eine sehr gute Visualisierung der Undichtigkeiten. Als Nachteile dieser Verfahren gelten insbesondere die Probleme der Standardisierung der Bedingungen (Zentrifugationsdauer, G-Zahl), die Problematik mit eingeschlossener Luft im System sowie die fehlende klinische Relevanz [145, 170, 191]. Ferner wurde gezeigt, dass pH-abhängig die Sichtbarkeit, etwa von *Methylenblau*, abnehmen kann [193]. Auch die Korrelation zu anderen Testverfahren ist nicht besonders hoch, wobei jedoch auch an die Nachteile anderer Testverfahren zu denken ist, welche ebenfalls für die mangelhafte Korrelation verantwortlich sein könnten [10, 34, 88, 191]. Auch die Korrelation der klinischen Situation mit den Ergebnissen von Farbstoffpenetrationstests wurde diskutiert [23, 129]. Zudem sind nahezu alle Farbstoff-

penetrationsstudien systembedingt destruktive Verfahren, da zur Visualisierung der Penetration eine Zerstörung der Probenzähne zur Gewinnung von Schnitten notwendig ist. Somit lassen diese Tests nur eine einmalige Analyse zu, die Proben lassen sich somit nicht wiederholt untersuchen. Als Modifikation kamen Farbstoffextraktionstests hinzu, bei welchen die penetrierten Farbstoffe wieder aus der Probe eluiert wurden und anschließend unter einem Extinktionsmessgerät oder Absorptionsmessgerät ausgewertet wurden [23, 37]. Hier ist jedoch keine Visualisierung der Farbstoffpenetration möglich.

Als weitere Testmethode kamen elektrochemische Kreisläufe zum Einsatz [83, 146]. Hierbei werden die Probenzähne in einen elektrischen Kreislauf eingebaut. Veränderungen der Leitfähigkeit, also insbesondere eine Erhöhung derselben, führen zu einer Veränderung der Anzeige im Messgerät. Vorteil ist eine zerstörungsfreie Dichtigkeitsanalyse, die auch wiederholte Messungen zulässt. Die Korrelation mit der realen Situation hinsichtlich der Detektion von Undichtigkeiten soll höher sein als bei klassischen Farbstoffpenetrationsuntersuchungen [81].

Radioaktive Isotope repräsentieren ein weiteres Testverfahren zur Detektion von Undichtigkeiten. Hierbei werden radioaktive Isotope z.B. ^{32}P , Kohlenstoff, ^{45}Ca oder radioaktiv markiertes ^{125}I Lysozym eingesetzt, deren Penetration in den Wurzelkanal oder entlang von Füllungen und Wurzelkanalfüllungen dargestellt werden kann [32, 34, 112]. Der ganz entscheidende Nachteil hierbei ist der immense Aufwand im Rahmen des experimentellen Teils dieses Testverfahrens. Auch hinsichtlich des entstehenden radioaktiven Abfalls, der vollständig als Sondermüll endgelagert werden muss, gilt diese Methode als sehr kostspielig und eignet sich somit nicht als Routine-Technik.

Das Flüssigkeitspenetrationsmodell stellt ein recht neues und allgemein akzeptiertes Verfahren, welches als wesentlichen Vorteil die Langzeitdichtigkeitsanalyse sowohl von Füllungen als auch von Wurzelkanalfüllungen bietet [18, 37, 89, 157]. Zudem lässt sich dieses Verfahren unter Laborbedingungen sehr gut standardisieren. Auch ist eine gute Quantifizierung von Undichtigkeiten möglich, welche anhand der zeitabhängig durchströmenden Flüssigkeit bestimmt wird. Als Nachteil ist zu nennen, dass systembedingt ausschließlich durchgehende Undichtigkeiten erkannt werden können (sog. "*through-and-through voids*"). Zudem ist eine Visualisierung, etwa wie bei der Farbstoffpenetration, systembedingt nicht möglich.

Ein weiteres Verfahren zur Dichtigkeitsanalyse ist der Glukosepenetrationstest. Dieses Analyseverfahren nutzt Glukose als Tracer, wobei die penetrierenden Moleküle in der unteren Kammer der Doppelkammer-Apparatur nachgewiesen werden können, sobald eine Penetration erfolgt [162, 196]. Nachteil ist auch hier wieder die Tatsache, dass nur eine Penetration nachweisbar ist, wenn die Glukose von einem Ende zum anderen Ende diffundiert ist. Zudem können verschiedene Stoffe die Glukosepenetration beeinträchtigen, so dass eine Verfälschung der Ergebnisse stattfinden kann [161].

Ein Testverfahren mit einer hohen klinischen Relevanz nutzt Endotoxine als Tracer [179]. Dabei ist dieses Verfahren insofern von Bedeutung, als Endotoxine auch im Bereich von kariösen Läsionen Bakterien bereits vor dem Erreichen der Pulpa durch ihre Stoffwechselprodukte zu chronischen oder auch akuten Schmerzen führen können [91]. Somit repräsentiert der Einsatz von Endotoxinen die klinische Situation recht gut, um relevante Ergebnisse bei durchgehenden Füllungsbereichen (Querschnitten, Wurzelkanälen) zu erhalten. Auch hier wird mit einem Zweikammer-Modell gearbeitet, wobei ein permanenter Nachweis von Endotoxin-Penetration in die untere Kammer geführt wird, wobei zu festgelegten Zeiten Proben der unteren Kammer auf Endotoxine hin überprüft werden müssen.

Die Bakterienpenetration stellt den wesentlichen Faktor für den endodontischen Misserfolg dar [158]. Daher wird schon seit geraumer Zeit für Dichtigkeitsuntersuchungen das als praxisnah etablierte und akzeptierte Verfahren das Bakterienpenetrationsmodell eingesetzt. Die besonderen Vorteile, die beispielsweise mit anderen Analyseverfahren nicht simuliert werden können, sind die klinisch relevanten Faktoren Bakterienwachstum sowie die Produktion von Stoffwechselprodukten, die mit anderen Modellen nicht imitiert werden können. Untersucht wurden hiermit in zahlreichen Studien insbesondere die Dichtigkeit von Wurzelkanalfüllungen, retrograden Füllungen im Rahmen der Wurzelspitzenresektionen und dem Verschluss koronaler Kavitäten [28, 92, 117, 156, 178].

Auch wenn dieses Modell nur, wie alle anderen Testverfahren, die klinische Situation nur unzureichend nachahmen kann, so ist jedoch eine erste Information zur Dichtigkeit von Obturationsmaterialien und Wurzelkanalfülltechniken möglich [156]. Zum Einsatz kamen zahlreiche verschiedene Bakterien wie *Enterococcus faecalis* [117], *Fusobacterium nucleatum* [27], *Lactobacillus casei* [115], *Proteus vulgaris* [178], *Pseudomonas aeruginosa* [191], *Pseudomonas fluorescens* [118],

Staphylococcus epidermidis [10, 88], *Streptococcus gordonii* [26, 104], *Streptococcus mutans* [11] und Kombinationen von verschiedenen Bakterien [92, 119, 166, 178]. Das Doppelkammer-Modell wurde bereits in zahlreichen Studien verwendet und hatte sich dort als geeignet erwiesen [10, 12, 49]. Die Herstellung des eingesetzten Doppelkammer-Modells wurde zuvor beschrieben und in dieser Weise bereits zahlreich eingesetzt [178].

Laktobazillen wurden bewusst im Rahmen dieser Studie als Tracer eingesetzt, da sie als fakultative Anaerobier einfach kultiviert und zudem leicht mittels mikroskopischer Analyse identifiziert werden können. Als S1-Keim lässt sich *L. casei* ATCC 11578 gut mit adäquatem Aufwand unter Laborbedingungen anzüchten und einsetzen. Es wurde daher bereits in einer endodontischen Studie verwendet [115]. *Laktobazillen* besitzen insbesondere als Karies verursachende Bakterien eine hohe klinische Relevanz [171]. *Laktobazillen* sind robuste, rasch wachsende Bakterien und werden regelmäßig in Gesellschaft mit anderen Bakterien im Speichel, kariösen Läsionen und sehr oft in periapikalen Prozessen nachgewiesen [22, 115, 150]. Der Keim *L. rhamnosus* ist ein alkali-resistentes, nicht-motiles und einzeln oder in Ketten vorliegendes stäbchenförmiges Bakterium, welches in Wurzelkanälen problemlos Calciumhydroxid-Einlagen widerstehen kann [161]. Seine kleine Größe (0.8 - 1,0 µm breit und 2 - 4 µm lang) ermöglicht ein Eindringen in Spalten und Hohlräume von Restaurationen und Wurzelkanalfüllungen, welche erheblich größere Spalten aufweisen [17, 138].

Es konnte nachgewiesen werden, dass *L. rhamnosus* zur Koaggregation mit anderen Bakterien neigt, insbesondere mit verschiedenen Streptococcus-Stämmen [19]. Daher wurde *L. rhamnosus* einzeln und nicht in Kombination mit anderen Keimen eingesetzt, um mögliche Interaktionen und Koaggregationen mit anderen Bakterien zu vermeiden. In einem Testlauf dieser Studie zeigte die negative Kontrollgruppe die Tauglichkeit des Versuchdesigns für den geplanten Einsatz. Der Einsatz eines Einzelkeimes für die Bakterienpenetrationsuntersuchung bietet den Vorteil einer einfacheren Möglichkeit der Detektion dieses Keimes in der unteren Testkammer.

Auch wenn im Gegensatz zu den anderen Analyseverfahren zur Untersuchung der koronalen Dichtigkeit das Bakterienpenetrationsmodell eine sehr hohe klinische Relevanz besitzt, so soll an dieser Stelle jedoch nicht verschwiegen werden, dass auch dieses Modell die klinische Situation zwar weitgehend, aber nicht vollständig nachahmen kann. So ist dieses Modell statisch, wobei systembedingt keine

Kausimulation und keine Bewegung der Bakteriensuspension in der oberen Testkammer simuliert werden konnte. Durch die Verwendung eines Einzelkeims als Tracer ergibt sich ein hinsichtlich der Bakterienflora nicht mit der klinischen Situation übereinstimmendes Milieu. Durch ein Ausbleiben von zusätzlichem Substrat und der Vermeidung von möglichen synergistischen Effekten zwischen verschiedenen Bakterien, die sonst zu einer Steigerung ihrer Produktivität fähig sein können, wären auch hinsichtlich der Penetrationszeiten Abweichungen der Ergebnisse dieser Studie von der realen klinischen Situation denkbar. Dennoch sind die Ergebnisse dieser Studie miteinander vergleichbar, da alle Gruppen mit demselben Tracer analysiert wurden. Es wurde im Hinblick auf eine sichere Identifikation der penetrierten Bakterien auf eine Simulation mittels humanem Speichel verzichtet. Die Schwierigkeit, ein geeignetes klinisches Modell für eine Bakterienpenetrationsuntersuchung zu entwickeln, zeigt sich in der Tatsache, dass bereits vor 25 Jahren eine Simulation klinischer Umgebungsbedingungen für die Dichtigkeitsanalysen gefordert wurde [178].

8.1.7 Sterilisation der Probenzähne

Für Bakterienpenetrationsstudien wurde die Gammasterilisation von Zähnen empfohlen [133]. In der vorliegenden Studie wurde mit einer standardisierten Bestrahlungsdosis von 25 kGray sterilisiert. Das ermöglichte eine zuverlässige Sterilisation des kompletten Versuchsaufbaus nach vollständiger Obturation der Wurzelkanäle, Platzierung des koronalen Verschlusses sowie dem Einbau des Zahnes in die Versuchsanordnung. Zudem hatte eine Studie die Effizienz der eingesetzten Prozedur zur Zerstörung sämtlicher Keime belegt [4].

8.2 Diskussion der Ergebnisse

8.2.1 Penetrationszeiten

Untersuchungen zur Bakteriendichtigkeit des koronalen Verschlusses nach erfolgter Wurzelkanalbehandlung zeigten einige Besonderheiten. So konnte gezeigt werden, dass die Dichtigkeit eines 1,5 - 3 mm dicken koronalen Verschlusses initial schlechter ist als nach 180 Tagen [157]. Die Penetrationszeiten zeigten sich in diversen Studien sehr variabel [10, 92, 178]. Anhand von Bakterienpenetrations-

studien wurde belegt, dass koronal freiliegende Wurzelkanalfüllungen je nach Obturationstechnik innerhalb von Tagen bis Wochen eine bakterielle Penetration bis zum apikalen Anteil der Wurzelkanalfüllung zulassen [12, 49, 151, 156, 178]. Dieselbe Beobachtung, also das Auftreten einer sehr hohen Variabilität der Penetrationszeiten, spiegelte sich auch in den Ergebnissen der vorliegenden Studie wider. Die hohen Standardabweichungen sind ein Indiz hierfür.

Adhäsive Konzepte sind in der Lage, die koronale Leakage deutlich zu reduzieren. Dieselben Beobachtungen wurden vor über 25 Jahren gemacht [113] und so wurde auch die Restauration tief zerstörter, endodontisch behandelter Molaren mittels Kompositen bereits zu dieser Zeit empfohlen [20]. Allerdings war im Rahmen dieser Studie keine Adhäsivsystem oder Verschlusskomposit in der Lage, bakterieller Penetration dauerhaft zu widerstehen.

8.2.2. Dichtigkeitsergebnisse und Einflussfaktoren für Dichtigkeit

In den zahlreichen publizierten Bakterienpenetrationsstudien zeigten die verschiedenen Wurzelkanalfülltechniken und Sealer sehr unterschiedliche Penetrationszeiten [49, 92, 175, 178]. In einer Studie konnte gezeigt werden, dass *P. vulgaris* eine durchschnittliche tägliche Penetrationsstrecke von 0,2 mm aufwies, während *S. epidermidis* mit 0,4 mm täglicher Penetrationsstrecke die doppelte Geschwindigkeit erzielte [178]. Hier dürfte als Ursache eine unterschiedliche Hemmwirkung der Wurzelkanalsealer auf die verschiedenen Keime verantwortlich sein [39, 63].

Die Ergebnisse dieser Studie zeigten eine deutlich höhere Dichtigkeit des adhäsiven Verschlusses bei Verwendung des Systems *Syntac Classic/Tetric Flow*. Das Legen eines koronalen Verschlusses unter Verwendung des Adhäsivsystems *Syntac Classic* führte im Rahmen der vorliegenden Studie zu erheblich höheren Dichtigkeitswerten, längeren Penetrationszeiten und geringeren täglichen Penetrationsstrecken als bei Verwendung von *Clearfil SE Bond*. Dies ist sehr wahrscheinlich bedingt durch die Zusammensetzung der Adhäsivsysteme. *Syntac Classic* enthält Glutaraldehyd in der Komponente *Syntac Adhesive*, welches nachweislich für die ausgeprägten antibakteriellen Effekte verantwortlich ist [55, 57]. Die rasche Penetration von Bakterien in der *Clearfil SE Bond/Tetric Flow*-Gruppe ist demnach möglicherweise dem Fehlen dieses Inhaltsstoffes anzulasten.

Auch das Adhäsivsystem für den koronalen Verschluss wurde bereits in einigen Studien als Einflussfaktor herausgestellt. So konnte belegt werden, dass *Total-etch*-Adhäsivsysteme in Klasse-V-Kavitäten signifikant dichtere Füllungsrän­der aufweisen als Füllungen, welche mit *Self-etch*-Systemen verarbeitet wurden [95]. Ferner ist die Dichtigkeit des koronalen Verschlusses signifikant vom verwendeten Füllungsmaterial abhängig. So wurde in den 90er Jahren des vergangenen Jahrhunderts eine signifikant höhere Dichtigkeit im Farbstoffpenetrationstest für Amalgamrestaurationen gefunden als für lichthärtende und chemisch härtende Komposite. Die Materialeigenschaften von Kompositen sind teilweise sehr verschieden. Der Elastizitätsmodul und die Schrumpfungseigenschaften sind stark bestimmende Faktoren für das Dimensionsverhalten von adhäsiv befestigten Füllungsmaterialien [147].

Komposite und Compomere konnten auch im Farbstoffpenetrationstest sehr hohe Dichtigkeitswerte erzielen, wobei *Tetric* keinerlei Undichtigkeiten aufwies [182]. Dabei kommt der sofortigen adhäsiven Restauration eine enorme Bedeutung zu, da sie durch den Wegfall einer für eine mögliche Speichelpenetration verantwortlichen zwischenzeitlichen temporären Versorgung eine höhere Erfolgsrate von wurzelkanalbehandelten Zähnen erzielen konnte als ein mehrzeitiges Vorgehen [152]. Als weitere Einflussfaktoren für die Variabilität der Penetrationszeiten sind beispielsweise die Kavitätengröße, die Schichtstärke der Füllung, die Fließfähigkeit des Füllungsmaterials, das Anfließverhalten des Füllungsmaterials, die Rheologie, Dimensionsänderungen während des Aushärtens sowie die Schwankungen des Zahns­ubstrates (Zahnalter, Sklerosierung) als mögliche weitere Einflussfaktoren denkbar. Dies könnte ein Grund für die unterschiedlichen Penetrationszeiten für *Tetric Flow* und *Grandio Flow* gegenüber *Clearfil Flow* sein. Damit kann anhand der Ergebnisse dieser Studie eine Dichtigkeitsabhängigkeit vom verwendeten Komposit (*Tetric* respektive *Grandio* vs. *Clearfil*) sowie eine Abhängigkeit vom Adhäsivsystem (*Syntac Classic* vs. *Clearfil SE Bond*) belegt werden. Auch sind, wenngleich nicht in der Ausprägung von Bedeutung, die Faktoren, welche die Obturation der Wurzelkanäle betreffen, als Ursachen denkbar. Dazu zählen die Kanalform, das Vorhandensein von mehreren Zahnwurzeln sowie die Abdichtungseigenschaften des verwendeten Sealers [178]. Da die Penetrationszeiten von Wurzelkanalfüllungen ohne einen adhäsiven Verschluss in der Regel recht kurz sind [115, 178], sind diese, zumal in allen Gruppen vergleichbar, nicht für die unterschiedlichen Durchschnitts­penetrationszeiten verantwortlich zu machen und scheiden daher als entscheidender Einflussfaktor aus.

Das Auftreten von koronaler Leakage trotz einer adhäsiven Verschlusses in allen experimentellen Gruppen zeigt deutlich, dass wurzelkanalbehandelte Zähne dennoch eine weitergehende koronale Restauration, etwa mittels adhäsiven Stumpfaufbaus oder einer indirekten adhäsiven Restauration benötigen. Somit muss es das Ziel der postendodontischen Versorgung sein, die Penetrationsstrecke für Bakterien zu maximieren, um langfristig den Erfolg der endodontischen Therapie zu sichern.

9 Schlussfolgerung

Basierend auf den Ergebnissen der vorliegenden Studie kommt sowohl der Wahl des Adhäsivsystems wie auch der Wahl des Flowable-Komposits für die Schaffung eines effizienten koronalen Verschlusses eine entscheidende Bedeutung zu. Der Goldstandard im Bereich der Adhäsiv-Systeme, *Syntac Classic*, erzielte bei Verwendung in Kombination mit zwei der drei untersuchten Komposite sehr lange Penetrationszeiten und war somit gegenüber *Clearfil SE Bond* deutlich aber nicht signifikant überlegen. Weiter zeigte *Syntac Classic* in Kombination mit *Clearfil Flow* die schlechtesten Ergebnisse. Allerdings zeigte auch das Komposit mit den besten Abdichtungseigenschaften in dieser Studie, *Tetric Flow*, bei Verwendung mit *Clearfil SE Bond* deutlich schlechtere Ergebnisse. Daher stellen sowohl das Adhäsivsystem als auch das Komposit einen Einflussfaktor für die Qualität des koronalen Verschlusses dar.

10 Literaturverzeichnis

1. Abou-Rass M, Oglesby SW: The effects of temperature, concentration and tissue type on the solvent ability of sodium hypochlorite. *J Endod* 7, 376-377 (1981)
2. Akagawa H, Nikaido T, Takada T, Burrow MF, Tagami J: Shear bond strengths to coronal and pulp chamber floor dentin. *Am J Dent* 15, 383-388 (2002)
3. Alves J, Walton R, Drake D: Coronal leakage: endotoxin penetration from mixed bacterial communities through obturated, post-prepared root canals. *J Endod* 24, 587-591 (1998)
4. Amaecha BT, Higham SM, Edgar WM: Effect of sterilisation methods on the structural integrity of artificial enamel caries for intraoral cariogenicity tests. *J Dent* 27, 313-316 (1999)
5. Amyra T, Walsh LT, Walsh LJ: An assessment of techniques for dehydrating root canals using infrared laser. *Aust Endod J* 26, 78-80 (2000)
6. Anderson RW, Powell BJ, Pashley DH: Microleakage of IRM used to restore endodontic access preparations. *Endod Dent Traumatol* 6, 137-141 (1990)
7. Antonopoulos KG, Attin T, Hellwig E: Evaluation of the apical seal of root canal fillings with different methods. *J Endod* 24, 655-658 (1998)
8. Ari H, Erdemir A, Belli S: Evaluation of the effect of endodontic irrigation solutions on the microhardness and the roughness of root canal dentin. *J Endod* 30, 792-795 (2004)
9. Attin T, Buchalla W, Kielbassa AM, Helwig E: Curing shrinkage and volumetric changes of resin-modified glass ionomer restorative materials. *Dent Mater* 11, 359-362 (1995)
10. Barthel CR, Moshonov J, Shuping G, Ørstavik D: Bacterial leakage versus dye leakage in obturated root canals. *Int Endod J* 32, 370-375 (1999)
11. Barthel CR, Strobach A, Briedigkeit H, Göbel UB, Roulet JF: Leakage in roots coronally sealed with different temporary fillings. *J Endod* 25, 731-734 (1999)
12. Baumgartner G, Zehnder M, Paqué: *Enterococcus faecalis* type strain leakage through root canals filled with Gutta-Percha/AH plus or Resilon/Epiphany. *J Endod* 33, 45-47 (2007)
13. Baumgartner JC, Mader CL: A scanning electron microscopic evaluation of four root canal irrigation regimens. *J Endod* 13, 147-157 (1987)

14. Beatty RG, Vertucci FJ, Zakariasen KL: Apical sealing efficacy of endodontic obturation techniques. *Int Endod J* 19, 237-241 (1986)
15. Beckham BM, Anderson RW, Morris CF: An evaluation of three materials as barriers to coronal microleakage in endodontically treated teeth. *J Endod* 19, 388-391 (1993)
16. Belli S, Zhang Y, Pereira PN, Pashley DH: Adhesive sealing of the pulp chamber. *J Endod* 27, 521-526 (2001)
17. Bergmans L, Moisiadis P, De Munck J, Van Meerbeek B, Lambrechts P: Effect of polymerization shrinkage on the sealing capacity of resin fillers for endodontic use. *J Adhes Dent* 7, 321-329 (2005)
18. Böttcher DE, Hirai VH, Da Silva Neto UX, Grecca FS: Effect of calcium hydroxide dressing on the long-term sealing ability of two different endodontic sealers: an in vitro study. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 110, 386-389 (2010)
19. Bradshaw GB, Hall A, Edmunds DH: The sealing of injection-molded thermoplasticized gutta-percha. *Int Endod J* 22, 17-20 (1989)
20. Brady WF: Composite resin interim restorations for broken-down nonvital posterior teeth. *J Am Dent Assoc* 106, 462-466 (1983)
21. Buonocore MG: A simple method of increasing the adhesion of acrylic filling materials to enamel surfaces. *J Dent Res* 34, 849-853 (1955)
22. Byun R, Nadkarni MA, Chhour KL, Martin FE, Jacques NA, Hunter N: Quantitative analysis of diverse *Lactobacillus* species present in advanced dental caries. *J Clin Microbiol* 42, 3128-36 (2004)
23. Camps J, Pashley D: Reliability of the dye penetration studies. *J Endod* 29, 592-594 (2003)
24. Carman JE, Wallace JA: An in vitro comparison of microleakage of restorative materials in the pulp chambers of human molar teeth. *J Endod* 20, 571-575 (1994)
25. Carrilho MR, Carvalho RM, de Goes MF, di Hipólito V, Geraldini S, Tay FR, Pashley DH, Tjäderhane L: Chlorhexidine preserves dentin bond in vitro. *J Dent Res* 86, 90-94 (2007)
26. Chailertvanitkul P, Abbott PV, Riley TV, Sooksuntisakoonchai N: Bacterial and dye penetration through interim restorations used during endodontic treatment of molar teeth. *J Endod* 35, 1017-1022 (2009)
27. Chailertvanitkul P, Saunders WP, MacKenzie D: Coronal leakage of obturated root canals after long-term storage using a polymicrobial marker. *J Endod* 23, 610-613 (1997)
28. Chailertvanitkul P, Saunders WP, Saunders EM, MacKenzie D: An evaluation of microbial coronal leakage in the restored pulp chamber of root-canal treated multirrooted teeth. *Int Endod J* 30, 318-322 (1997)

29. Chang YE, Shin DH: Effect of chlorhexidine application methods on microtensile bond strength to dentin in Class I cavities. *Oper Dent* 35, 618-623 (2010)
30. Cobankara FK, Adanir N, Belli S, Pashley DH: A quantitative evaluation of apical leakage of four root-canal sealers. *Int Endod J* 35, 979-984 (2002)
31. Cobankara FK, Altinöz HC, Ergani O, Kav K, Belli S: In vitro antibacterial activities of root-canal sealers by using two different methods. *J Endod* 30, 57-60 (2004)
32. Cochran MA, Gonzales MA, Platt JA, Moore BK: In vitro microleakage of four tracers with multiple applications to the same tooth. *Oper Dent* 29, 443-447 (2004)
33. Dalton BC, Ørstavik D, Phillips C, Pettiette M, Trope M: Bacterial reduction with nickel-titanium rotary instrumentation. *J Endod* 24, 763-767 (1998)
34. De Almeida JB, Platt JA, Oshida Y, Moore BK, Cochran MA, Eckert GJ: Three different methods to evaluate microleakage of packable composites in Class II restorations. *Oper Dent* 28, 453-460 (2003)
35. De Almeida WA, Leonardo MR, Tanomaru Filho M, Silva LA: Evaluation of apical sealing of three endodontic sealers. *Int Endod J* 33, 25-27 (2000)
36. De-Deus G, Gurgel-Filho ED, Magalhaes KM, Coutinho-Filho T: A laboratory analysis of gutta-percha-filled area obtained using Thermafil, System B and lateral condensation. *Int Endod J* 39, 378-383 (2006)
37. De-Deus G, Leal F, Soares J, Luna AS, Murad C, Fidel S, Fidel RA: Dye extraction results on bacterial leakproof root fillings. *J Endod* 34, 1093-1095 (2008)
38. De-Deus G, Maniglia-Ferreira CM, Gurgel-Filho ED, Paciornik S, Machado AC, Coutinho-Filho T: Comparison of the percentage of gutta-percha-filled area obtained by Thermafil and System B. *Aust Endod J* 33, 55-61 (2007)
39. Deines I: Der Einfluss verschiedener Wurzelkanalsealer auf das Wachstum unterschiedlicher Bakterien. *Med Diss Erlangen* (2008)
40. Deliperi S, Bardwell DN: An alternative method to reduce polymerization shrinkage in direct posterior composite restorations. *J Am Dent Assoc* 133, 1387-1398 (2002)
41. De Moor RJ, De Bruyne: The long-term sealing ability of AH 26 and AH plus used with three gutta-percha obturation techniques. *Quintessence Int* 35, 326-331 (2004)
42. De Moor RJ, Hommez GM: The long-term sealing ability of an epoxy resin root canal sealer used with five gutta percha obturation techniques. *Int Endod J* 35, 275-282 (2002)

43. De Munck J, Van Meerbeek B, Yoshida Y, Inoue S, Suzuki K, Lambrechts P: Four-year water degradation of a resin-modified glass-ionomer adhesive bonded to dentin. *Eur J Oral Sci* 112, 73-83 (2004)
44. Diaz-Arnold AM, Wilcox LR: Restoration of endodontically treated anterior teeth: an evaluation of coronal microleakage of glass ionomer and composite resin materials. *J Prosthet Dent* 64, 643-646 (1990)
45. Dummer PMH, Lyle L, Rawle J, Kennedy JK: A laboratory study of root fillings in teeth obturated by lateral condensation of gutta-percha or Thermafil obturators. *Int Endod J* 27, 32-38 (1994)
46. Ebert J, Löffler C, Roggendorf MJ, Petschelt A, Frankenberger R: Clinical adhesive sealing of the pulp chamber following endodontic treatment: influence of thermomechanical loading on microleakage. *J Adhes Dent* 11, 311-317 (2009)
47. Ebert J, Roggendorf MJ, Frank K, Petschelt A: Antimicrobial activity of various active gutta-percha points against *Enterococcus faecalis* in simulated root canals. *Int Endod J* 41, 249-257 (2008)
48. El-Askary FS, Nassif MS, Fawzy AS: Shear bond strength of glass-ionomer adhesive to dentin: effect of smear layer thickness and different dentin conditioners. *J Adhes Dent* 10, 471-490 (2008)
49. Eldeniz AU, Ørstavik D: A laboratory assessment of coronal bacterial leakage in root canals filled with new and conventional sealers. *Int Endod J* 42, 303-312 (2009)
50. Eleazer PD, Eleazer KR: Air pressures developed beyond the apex from drying root canals with pressurized air. *J Endod* 24, 833-836 (1998)
51. Ellakwa A, Cho N, Lee IB: The effect of resin matrix composites on the polymerization shrinkage and rheological properties of experimental dental composites. *Dent Mater* 23, 1229-1235 (2007)
52. European Society of Endodontology (ESE): Qualitätsrichtlinien endodontischer Behandlungen. *Endodontie* 3, 263 (1994)
53. European Society of Endodontology (ESE): Undergraduate curriculum guidelines for endodontology. *Int Endod J* 25, 169-172 (1992)
54. Facer SR, Walton RE: Intracanal distribution patterns of sealers after lateral condensation. *J Endod* 29, 832-834 (2003)
55. Fairbourn DR, Charbeneau GT, Loesche WJ: Effect of improved Dycal and IRM on bacteria in deep carious lesions. *J Am Dent Assoc* 100, 547-552 (1980)
56. Feilzer AJ, De Gee AJ, Davidson CL: Setting stress in composite resin in relation to configuration of the restoration. *J Dent Res* 66, 1636-1639 (1987)

57. Felton D, Bergenholtz G, Cox CF: Inhibition of bacterial growth under composite restorations following GLUMA pretreatment. *J Dent Res* 68, 491-495 (1989)
58. Ferguson DB, Marley JT, Hartwell GR: The effect of chlorhexidine gluconate as an endodontic irrigant on the apical seal: long term results. *J Endod* 29, 91-94 (2003)
59. Ferrari M, Mannocci F, Vichi A, Cagidiaco MC, Mjør IA: Bonding to root canal: structural characteristics of the substrate. *Am J Dent* 13, 255-260 (2000)
60. Ferrari M, Tay FR: Technique sensitivity in bonding to vital, acid-etched dentin. *Oper Dent* 28, 3-8 (2003)
61. Frankenberger R, Krämer N, Oberschachtsiek H, Petschelt A: Dentin bond strength and marginal adaption after NaOCl pre-treatment. *Oper Dent* 25, 40-45 (2000)
62. Frankenberger R, Krämer N, Petschelt A: Fatigue behaviour of different dentin adhesives. *Clin Oral Investig* 3, 11-17 (1999)
63. Freyberger S: Inhibition des Bakterienwachstums durch verschiedene Wurzelkanalsealer. *Med Diss Erlangen* (2008)
64. Galvan RR Jr, West LA, Liewehr FR, Pashley DH: Coronal microleakage of five materials used to create an intracoronaral seal in endodontically treated teeth. *J Endod* 28, 59-61 (2002)
65. Gani O, Visvisian C, de Caso C: Quality of apical seal in curved canals using three types of spreaders. *J Endod* 26, 581-585 (2000)
66. Garcia-Godoy F, Krämer N, Feilzer AJ, Frankenberger R: Long-term degradation of enamel and dentin bonds: 6-year results in vitro vs. in vivo. *Dent Mater* 26, 1113-1118 (2010)
67. Gencoglu N, Garip Y, Bas M, Samani S: Comparison of different gutta-percha root filling techniques: Thermafil, Quick-Fill, System B, and lateral condensation. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 93, 333-336 (2002)
68. Gerstbrein O: Dichtigkeitsuntersuchung von Wurzelkanalfüllungen nach verschiedenen medikamentösen Einlagen. *Med Diss Erlangen* (2010)
69. Gonçalves F, Pfeifer CC, Stansbury JW, Newman SM, Braga RR: Influence of matrix composition on polymerization stress development of experimental composites. *Dent Mater* 26, 697-703 (2010)
70. Guerra JA, Skribner JE, Lin LM: Influence of a base on coronal microleakage of post-prepared teeth. *J Endod* 20, 589-591 (1994)
71. Guess GM, Edwards KR, Yang ML, Igbal MK, Kim S: Analysis of continuous-wave obturation using a single-cone and hybrid technique. *J Endod* 29, 509-512 (2003)

72. Gwinnett AJ, Kanca JA 3rd: Micromorphology of the bonded dentin interface and its relationship to bond strength. *Am J Dent* 5, 73-77 (1992)
73. Hand RE, Smith ML, Harrison JW: Analysis of the effect of dilution on the necrotic tissue dissolution property of sodium hypochlorite. *J Endod* 4, 60-64 (1978)
74. Heling I, Gorfil C, Slutzky H, Kopolovic K, Zalkind M, Slutzky-Goldberg I: Endodontic failure caused by inadequate restorative procedures: review and treatment recommendations. *J Prosthet Dent* 87, 674-678 (2002)
75. Herbert J, Bruder M, Braunsteiner J, Altenburger MJ, Wrbas KT: Apical quality and adaption of Resilon, EndoREZ, and Guttaflow root canal fillings in combination with a noncompaction technique. *J Endod* 35, 261-264 (2009)
76. Hosoya N, Nomura M, Yoshikubo A, Arai T, Nakamura J, Cox CF: Effect of canal drying methods on the apical seal. *J Endod* 26, 292-294 (2000)
77. Hosoya Y, Shinkawa H, Suefiji C, Nozaka K, Garcia-Godoy F: Effects of diamond bur particle size on dentin bond strength. *Am J Dent* 17, 359-364 (2004)
78. Huth KC, Quirling M, Maier S, Kamereck K, Alkhayer M, Pashos E, Welsch U, Miethke T, Brand K, Hickel R: Effectiveness of ozone against endodontopathogenic microorganisms in a root canal biofilm model. *Int Endod J* 42, 3-13 (2009)
79. Huumonen S, Lenander-Lumikari M, Sigurdsson A, Ørstavik D: Healing of apical periodontitis after endodontic treatment: a comparison between a silicon-based and zinc oxide-eugenol-based sealer. *Int Endod J* 36, 296-301 (2002)
80. Ishley DJ, ElDeeb ME: An in vitro assessment of the quality of apical seal of thermomechanically obturated canals with and without sealer. *J Endod* 9, 242-245 (1983)
81. Iwami Y, Hayashi M, Takeshige F, Ebisu S: The accuracy of electrical method for microleakage evaluation by a three-dimensional analysis. *J Dent* 35, 268-274 (2007)
82. Jacobsen EL, Karras LG, BeGole EA, Daniel JC: Long-term sealing efficacy of four root surface sealing materials used in endodontic leakage studies, *J Endod*. 19, 587-590 (1993)
83. Jacquot BM, Panighi MM, Steinmetz P, G'sell C: Evaluation of temporary restorations' microleakage by means of electrochemical impedance measurements. *J Endod* 22, 586-589 (1996)
84. Jardine SJ, Gulabivala K: An in vitro comparison of canal preparation using two automated rotary nickel-titanium instrumentation techniques. *Int Endod J* 33, 381-391 (2000)

85. Jöckel VR, Baumann MA, Roggendorf HC: Materials and techniques for endodontology in german dental schools. *J Dent Res* (2004)
86. Juhasz A, Verdes E, Tökes L, Kobor A, Dobo-Nagy C: The influence of root canal shape on the sealing ability of two root canal sealers. *Int Endod J* 39, 282-286 (2006)
87. Kakaboura A, Rahiotis C, Watts D, Silikas N, Eliades G: 3D-marginal adaptation versus setting shrinkage in light-cured microhybrid resin composites. *Dent Mater* 23, 272-278 (2007)
88. Karagenc B, Gencoglu N, Ersoy M, Cansever G, Külekci G: A comparison of four different microleakage tests for assessment of leakage of root canal fillings. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 102, 110-113 (2006)
89. Kardon BP, Kuttler S, Hardigan P, Dorn SO: An in vitro evaluation of the sealing ability of a new root-canal-obturation system. *J Endod* 29, 658-661 (2003)
90. Kennedy WA, Walker WA, Gough RW: Smear layer removal effects on apical leakage. *J Endod* 12, 21-27 (1986)
91. Khabbaz MG, Anastasiadis PL, Sykaras SN: Determination of endotoxins in caries: association with pulpal pain. *Int Endod J* 33, 132-137 (2000)
92. Khayat A, Lee SJ, Torabinejad M: Human saliva penetration of coronally unsealed obturated root canals. *J Endod* 19, 458-461 (1993)
93. Kim SK, Kim YO: Influence of calcium hydroxide intracanal medication on apical seal. *Int Endod J* 35, 623-628 (2002)
94. Klevant FJ, Eggink CO: The effect of canal preparation on periapical disease. *Int Endod J* 16, 68-75 (1983)
95. Koliniotou-Koumpia E, Dionysopoulos P, Koumpia E: In vivo evaluation of microleakage from composites with new dentine adhesives. *J Oral Rehabil* 31, 1014-1022 (2004)
96. Kontakiotis EG, Tsatsoulis IN, Papanakou SI, Tzanetakis GN: Effect of 2% chlorhexidine gel mixed with calcium hydroxide as an intracanal medication on sealing ability of permanent root canal filling: a 6-month follow-up. *J Endod* 34, 866-870 (2008)
97. Kontakiotis EG, Tzanetakis GN, Loizides AL: A 12-month longitudinal in vitro leakage study on a new silicon-based root canal filling material (GuttaFlow). *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 103, 854-849 (2007)
98. Kontakiotis EG, Wu MK, Wesselink PR: Effect of sealer thickness on long-term sealing ability: a 2-year follow-up study. *Int Endod J* 30, 307-312 (1997)

99. Kusunoki M, Itoh K, Oikawa M, Hisamitsu H: Measurement of shear bond strength to intact dentin. *Dent Mater J* 29, 199-205 (2010)
100. Lee KW, Williams MC, Camps JJ, Pashley DH: Adhesion of endodontic sealers to dentin and gutta-percha. *J Endod* 28, 684-688 (2002)
101. Lee MR, Cho BH, Son HH, Um CM, Lee IB: Influence of cavity dimension and restoration methods on the cusp deflection of premolars in composite restoration. *Dent Mater* 23, 288-295 (2007)
102. Leonard JE, Gutmann JL, Guo IY: Apical and coronal seal of roots obturated with a dentine bonding agent and resin. *Int Endod J* 29, 76-83 (1996)
103. Lohbauer U, Gambarini G, Ebert J, Dasch W, Petschelt A: Calcium release and pH-characteristics of calcium hydroxide plus points. *Int Endod J* 10, 683-689 (2005)
104. Love RM: *Enterococcus faecalis* - a mechanism for its role in endodontic failure. *Int Endod J* 34, 399-405 (2001)
105. Loyola-Rodriguez JP, Garcia-Godoy F, Lindquist R: Growth inhibition of glass ionomer cements on mutans streptococci. *Pediatr Dent* 16, 346-349 (1994)
106. Lussi A, Imwinkelried S, Stich H: Obturation of root canals with different sealers using non-instrumentation technology. *Int Endod* 32, 17-23 (1999)
107. Macedo RG, Wesselink PR, Zaccheo F, Fanali D, van der Sluis LWM: Reaction rate of NaOCl in contact with bovine dentine: effect of activation, exposure time, concentration and pH. *Int Endod J* 43, 1108-1115 (2010)
108. Magura ME, Kafrawy AH, Brown CE Jr, Newton CW: Human saliva coronal microleakage in obturated root canals: an in vitro study. *J Endod* 17, 324-331 (1991)
109. Mancini M, Armellin E, Casaglia A, Cerroni L, Cianconi L: A comparative study of smear layer removal and erosion in apical intraradicular dentine with three irrigating solutions: a scanning electron microscopy evaluation. *J Endod* 35, 900-903 (2009)
110. Manso AP, Marquezini L Jr, Silva SM, Pashley DH, Tay FR, Carvalho RM: Stability of wet versus dry bonding with different solvent-based adhesives. *Dent Mater* 24, 476-482 (2008)
111. Marin-Bauza GA, Rached-Junior FJ, Souza-Gabriel AE, Sousa-Neto MD, Miranda CE, Silva-Sousa YT: Physicochemical properties of methacrylate resin-based root canal sealers. *J Endod* 36, 1531-1536 (2010)
112. Marosky JE, Patterson SS, Swartz M: Marginal leakage of temporary sealing materials used between endodontic appointments and assessed by calcium 45 – an in vitro study. *J Endod* 3, 110-113 (1977)

113. Martin FE, Bryant RW: Adaptation and microleakage of composite resin restorations. *Aust Dent J* 29, 362-370 (1984)
114. Matalon S, Weiss EI, Gorfil C, Noy D, Slutzky H: In vitro antibacterial evaluation of flowable restorative materials. *Quintessence Int* 40, 327-332 (2009)
115. Mavec JC, McClanahan SB, Minah GE, Johnson JD, Blundell RE Jr: Effects of an intracanal glass ionomer barrier on coronal microleakage in teeth with post space. *J Endod* 32, 120-122 (2006)
116. McComb D, Smith DC: A preliminary scanning electron microscopic study of root canals after endodontic procedures. *J Endod* 1, 238-242 (1975)
117. McDougall IG, Patel V, Santerre P, Friedman S: Resistance of experimental glass ionomer cement sealers to bacterial penetration in vitro. *J Endod* 25, 739-742 (1999)
118. Michalesco PM, Valcarel J, Grieve AR, Levallois B, Lerner D: Bacterial leakage in endodontics: an improved method for quantification. *J Endod* 22, 535-539 (1996)
119. Miletic I, Prpic-Mehicic G, Marsan T, Tambic-Andrasevic A, Piesko S, Karlovic Z, Anic I: Bacterial and fungal microleakage of AH26 and AH Plus root canal sealers. *Int Endod J* 35, 428-432 (2002)
120. Molander A, Caplan D, Bergenholtz G, Reit C: Improved quality of root fillings provided by general dental practitioners educated in nickel-titanium rotary instrumentation. *Int Endod J* 40, 254-260 (2007)
121. Morris MD, Lee KW, Agee KA, Bouillaquet S, Pashley DH: Effects of sodium hypochlorite and RC-prep on bond strength of resin cement to endodontic surfaces. *J Endod* 27, 753-757 (2001)
122. Naenni N, Thoma K, Zehnder M: Soft tissue dissolution capacity of currently used and potential endodontic irrigants. *J Endod* 30, 785-787 (2004)
123. Nakabayashi N: The hybrid layer: a resin-dentin composite. *Proc Finn Dent Soc* 88, 321-329 (1992)
124. Nakaijo K, Nakazawa F, Iwaku M, Hoshino E: Alkali-resistant bacteria in root canal systems. *Oral Microbiol Immunol* 19, 390-394 (2004)
125. Nakajima M, Kanemura N, Pereira PN, Tagami J, Pashley DH: Comparative microtensile bond strength and SEM analysis of bonding to wet and dry dentin. *Am J Dent* 13, 324-328 (2000)
126. Nawal RR, Parande M, Sehgal R, Rao NR, Naik A: A comparative evaluation of 3 root canal filling systems. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*, 1-7 (2011)

127. Nikolaenko SA, Lohbauer U, Roggendorf M, Petschelt A, Dasch W, Frankenberger R: Influence of c-factor and layering technique on microtensile bond strength to dentin. *Dent Mater* 20, 579-585 (2004)
128. Oliveira LD, Carvalho CA, Nunes W, Valera MC, Camargo CH, Jorge AO: Effects of chlorhexidine and sodium hypochlorite on the microhardness of root canal dentin. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 104, e125-e128 (2007)
129. Oliver CM, Abbott PV: Correlation between clinical success and apical dye penetration. *Int Endod J* 34, 637-644 (2001)
130. Ørstavik D: Materials used for root canal obturation: technical, biological and clinical testing. *Endod Topics* 12, 25-38 (2005)
131. Ørstavik D, Nordahl I, Tibbals JE: Dimensional change following setting of root canal sealer materials. *Dent Mater* 17, 512-519 (2001)
132. Öztürk B, Özer F, Belli S: An in vitro comparison of adhesive systems to seal pulp chamber walls. *Int Endod J* 37, 297-306 (2004)
133. Padachey N, Patel V, Santerre P, Cvitkovitch D, Lawrence HP, Friedman S: Resistance of a novel root canal sealer to bacterial ingress in vitro. *J Endod* 26, 656-659 (2000)
134. Park J, Chang J, Ferracane J, Lee IB: How should composite be layered to reduce shrinkage stress: incremental or bulk filling? *Dent Mater* 24, 1501-1505 (2008)
135. Pashley DH: Smear layer: physiological considerations. *Oper Dent Suppl* 3, 13-29 (1984)
136. Pashley DH: Clinical considerations of microleakage. *J Endod* 16, 70-77 (1990)
137. Pashley DH, Ciucchi B, Sano H, Horner JA: Permeability of dentin to adhesive agents. *Quintessence Int* 24, 618-631 (1993)
138. Pashley DH, Tay FR, Carvalho RM, Rueggeberg FA, Agee KA, Carriho M, Donnelly A, Garcia-Godoy F: From dry bonding to water-wet bonding to ethanol-wet bonding. A review of the interactions between dentin matrix and solvated resins using a macromodel of the hybrid layer. *Am J Dent* 20, 7-20 (2007)
139. Pathomvanich S, Edmunds DH: Variation in the microleakage produced by four different techniques in root fillings in a simulated root canal model. *Int Endod J* 29, 156-162 (1996)
140. Petschelt A: Endodontie: maschinell – manuell? Die Aufbereitung und Spülung des Wurzelkanals. *Dtsch Zahnärztl Z* 44, 407-413 (1989)
141. Petschelt A: Das Trocknen des Wurzelkanals. *Dtsch Zahnärztl Z* 45, 222-226 (1990)

142. Petschelt A, Dobler J: Großvolumige versus aktivierte Wurzelkanal-spülung. Dtsch Zahnärztl Z 46, 285-287 (1991)
143. Petschelt A, Stumpf B, Raab W: Dichtigkeit von Wurzelfüllungen mit und ohne Schmierschicht (Smear layer). Dtsch Zahnärztl Z 42, 743-746 (1987)
144. Pisano DM, DiFiore PM, McClanahan SB, Lautenschlager EP, Duncan JL: Intraorifice sealing of gutta-percha obturated root canals to prevent coronal microleakage. J Endod 24, 659-662 (1998)
145. Plotino G, Grande NM, Mazulli N, Chiaradia G, La Torre G, Somma F: Influence of reduced air pressure methods on dye penetration in standardized voids. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod 103, 289-294 (2007)
146. Pradelle-Plasse N, Wenger F, Picard B, Colon P: Evaluation of microleakage of composite resin restorations by an electrochemical technique: the impedance methodology. Dent Mater 20, 425-434 (2004)
147. Preussker S, Klimm W, Pöschmann M, Koch R: Microbial ingrowth around single- and multi-component adhesive studied in vitro. Caries Res 37, 345-351 (2003)
148. Ray HA, Trope M: Periapical status of endodontically treated teeth in relation to the technical quality of the root filling and the coronal restoration. Int Endod J 28, 12-18 (1995)
149. Reis C, De-Deus G, Leal F, Azevedo E, Coutinhi-Filho T, Paciornik S: Strong effect on dentin after the use of high concentrations of citric acid: an assessment with co-site optical microscopy and ESEM. Dent Mater 24, 1608-1615 (2008)
150. Richard B, Groisillier A, Badet C, Dorignac G, Lonvaud-Funel A: Identification of salivary Lactobacillus rhamnosus species by DNA profiling and a specific probe. Res Microbiol 152, 157-165 (2001)
151. Roggendorf MJ, Ebert J, Petschelt A, Frankenberger R: Influence of moisture on the apical seal of root canal fillings with five different types of sealer, J Endod 33, 31-33 (2007)
152. Safavi KE, Dowden WE, Langeland K: Influence of delayed coronal permanent restoration on endodontic prognosis. Endod Dent Traumatol 3, 187-191 (1987)
153. Saghiri MA, Delvarani A, Mehrvarzfar P, Malganji G, Lofti M, Dadresanfar B, Saghiri AM, Dadvand S: A study of the relation between erosion and microhardness of root canal dentin. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod 108, e29-e34 (2009)
154. Saleh IM, Ruyter IE, Haapasalo M, Ørstavik D: The effects of dentine pretreatment on the adhesion of root-canal sealers. Int Endod J 35, 859-866 (2002)

155. Saleh IM, Ruyter IE, Haapasalo M, Ørstavik D: Adhesion of endodontic sealers: scanning electron microscopy and energy dispersive spectroscopy. *J Endod* 29, 595-601 (2003)
156. Saleh IM, Ruyter IE, Haapasalo M, Ørstavik D: Bacterial penetration along different root canal filling materials in the presence or absence of smear layer. *Int Endod J* 41, 32-40 (2008)
157. Santos J, Tjäderhane L, Ferraz C, Zaia A, Alves M, De Goes M, Carrilho M: Long-term sealing ability of resin-based root canal fillings. *Int Endod J* 43, 455-460 (2010)
158. Saunders WP, Saunders EM: Coronal leakage as a cause of failure in root-canal therapy: a review. *Endod Dent Traumatol* 10, 105-108 (1994)
159. Schäfer E, Zandbiglari T: Solubility of root-canal sealers in water and artificial saliva. *Int Endod J* 36, 660-669 (2003)
160. Sedgley C: Root canal irrigation - a historical perspective. *J Hist Dent* 52, 61-65 (2004)
161. Shemesh H, Souza EM, Wu MK, Wesselink PR: Glucose reactivity with filling materials as a limitation for using the glucose leakage model. *Int Endod J* 41, 869-872 (2008)
162. Shemesh H, van der Bos M, Wu MK, Wesselink PR: Glucose penetration and fluid transport through coronal root structure and filled root canals. *Int Endod J* 40, 866-872 (2007)
163. Shindo K, Kakuma Y, Ishikawa H, Kobayashi C, Suda H: The influence of orifice sealing with various filling materials on coronal leakage. *Dent Mater J* 23, 419-423 (2004)
164. Sideridou ID, Karabela MM, Vouvoudi EC: Volumetric dimensional changes of dental light-cured dimethacrylate resins after sorption of water or ethanol. *Dent Mater* 24, 1131-1136 (2008)
165. Siqueira JF Jr, Lima KC, Magalhaes FA, Lopes HP, De Uzenda M: Mechanical reduction of the bacterial population in the root canal by three instrumentation techniques. *J Endod* 25, 332-335 (1999)
166. Siqueira JF Jr, Rocas IN, Favieri A, Abad EC, Castro AJ, Gahyva SM: Bacterial leakage in coronally unsealed root canals obturated with 3 different techniques. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 90, 647-650 (2000)
167. Sjögren U, Figdor D, Persson S, Sundqvist G: Influence of infection at the time of root filling on the outcome of endodontic treatment of teeth with apical periodontitis. *Int Endod J* 30, 297-306 (1997)
168. Sjögren U, Figdor D, Spångberg L, Sundqvist G: The antimicrobial effect of calcium hydroxide as a short-term intracanal dressing. *Int Endod J* 24, 119-125 (1991)

169. Souza EM, Pappen FG, Shemesh H, Bonanato-Estreia C, Bonetti-Filho I: Reliability of assessing dye penetration along root canal fillings using methylene blue. *Aust Endod J* 35, 158-163 (2009)
170. Spångberg LSW, Acierno TG, Cha BY: Influence of entrapped air on the accuracy of leakage studies using dye penetration methods. *J Endod* 15, 548-551 (1989)
171. Steinle CJ, Madonia JV, Bahn AN: Relationship of lactobacilli to the carious lesion. *J Dent Res* 46, 191-196 (1967)
172. Swanson K, Madison S: An evaluation of coronal microleakage in endodontically treated teeth. Part I. Time periods. *J Endod* 13, 56-59 (1987)
173. Taha NA, Palamara JE, Messer HH: Cuspal deflection, strain and microleakage of endodontically treated premolar teeth restored with direct resin composites. *J Dent* 37, 724-730 (2009)
174. Tamse A, Katz A, Kaban F: Comparison of apical leakage shown by four different dyes with two evaluating methods. *Int Endod J* 31, 333-337 (1998)
175. Tasdemir T, Er K, Yildirim T, Buruk K, Celik D, Cora S, Tahan E, Tuncel B, Serper A: Comparison of the sealing ability of three filling techniques in canals shaped with two different rotary systems: a bacterial leakage study. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 208, 129-134 (2009)
176. Toba S, Veerapavati W, Shimada Y, Nikaido T, Tagami J: Micro-shear bond strengths of adhesive resins to coronal dentin versus the floor of the pulp chamber. *Am J Dent* 16, 51A-56A (2003)
177. Torabinejad M, Rastegar AF, Kettering JD, Pitt Ford TR: Bacterial leakage of mineral trioxide aggregate as a root-end filling material. *J Endod* 21, 109-112 (1995)
178. Torabinejad M, Ung B, Kettering JD: In vitro bacterial penetration of coronally unsealed endodontically treated teeth. *J Endod* 16, 566-569 (1990)
179. Trope M, Chow E, Nissan R: In vitro endotoxin penetration of coronally unsealed endodontically treated teeth. *Endod Dent Traumatol* 11, 90-94 (1995)
180. Turk BT, Sen BH, Öztürk T: In vitro antimicrobial activity of calcium hydroxide mixed with different vehicles against *Enterococcus faecalis* and *Candida albicans*. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 108, 297-301 (2009)
181. Tzanetakis GN, Kakavetsos VD, Kontakiotis EG: Impact of smear layer on sealing property of root canal obturation using 3 different techniques and sealers. Part I. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 109, e145-e153 (2010)

182. Uranga A, Blum JY, Esber S, Parahy E, Prado C: A comparative study of four coronal obturation materials in endodontic treatment. *J Endod* 25, 178-180 (1999)
183. van der Sluis LW, Wu MK, Wesselink PR: The efficacy of ultrasonic irrigation to remove artificially placed dentine debris from human root canals prepared using instruments of varying taper. *Int Endod J* 38, 764-768 (2005)
184. Vassiliadis L, Liolios E, Kouvas V, Economides N: Effect of smear layer on coronal microleakage. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 82, 315-320 (1996)
185. Vivacqua-Gomes N, Ferraz CC, Gomes BP, Zaia AA, Teixeira FB, Souza-Filho FJ: Influence of irrigants on the coronal microleakage of laterally condensed gutta-percha root fillings. *Int Endod J* 35, 791-795 (2002)
186. Wei YJ, Silikas N, Zhang ZT, Watts DC: Hygroscopic dimensional changes of self-adhering and new resin-matrix composites during water sorption/desorption cycles. *Dent Mater* 27, 259-266 (2011)
187. Welch JD, Anderson RW, Pashley DH, Weller RN, Kimbrough WF: An assessment of the ability of various materials to seal furcation canals in molar teeth. *J Endod* 22, 608-611 (1996)
188. White RR, Goldman M, Lin PS: The influence of the smeared layer upon dentinal tubule penetration by endodontic filling materials. Part II. *J Endod* 13, 369-374 (1987)
189. Wilcox LR, Diaz-Arnold A: Coronal microleakage of permanent lingual access restorations in endodontically treated anterior teeth. *J Endod* 15, 584-587 (1989)
190. Wolanek GA, Loushine RJ, Weller RN, Kimbrough WF, Volkmann KR: In vitro bacterial penetration of endodontically treated teeth coronally sealed with a dentin bonding agent. *J Endod* 27, 354-357 (2001)
191. Wu MK, De Gee AJ, Wesselink PR, Moorer WR: Fluid transport and bacterial penetration along root canal fillings. *Int Endod J* 26, 203-208 (1993)
192. Wu MK, Kast'akova A, Wesselink PR: Quality of cold and warm gutta-percha fillings in oval canals in mandibular premolars. *Int Endod J* 34, 485-491 (2001)
193. Wu MK, Kontaiotis EG, Wesselink PR: Decoloration of 1% methylene blue solution in contact with dental filling materials. *J Dent* 26, 585-589 (1998)
194. Wu MK, Özok AR, Wesselink PR: Sealer distribution in root canals obturated by three techniques. *Int Endod J* 33, 340-345 (2000)

195. Wu MK, van der Sluis LW, Wesselink PR: A 1-year-follow-up study on leakage of single-cone fillings with Roeko RSA sealer. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 101, 662-667 (2006)
196. Xu Q, Fan MW, Fan B, Cheung GSP, Hu HL: A new quantitative method using glucose for analysis of endodontic leakage. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 99, 107-111 (2005)
197. Yared GM, Dagher FE: Influence of apical enlargement on bacterial infection during treatment of apical periodontitis. *J Endod* 20, 535-537 (1994)
198. Younis O, Hembree JH: Leakage of different root canal sealants. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 41, 777-784 (1976)
199. Zehnder M: Root canal irrigants. *J Endod* 32, 389-398 (2006)
200. Zhang H, Shen Y, Ruse ND, Haapasalo M: Antibacterial activity of endodontic sealers by modified direct contact test against *Enterococcus faecalis* 35, 1051-1055 (2009)

11 Anhang

Abkürzungsverzeichnis

<i>EDTA</i>	Ethylendiamintetraacetat
<i>Bis-GMA</i>	Bisphenol-A-Glycidyl-Methacrylat
<i>HEMA</i>	Hydroxyethylmethacrylat
<i>NaOCl</i>	Natriumhypochlorit
<i>PEGDMA</i>	Polyethylenglycoldimethacrylat
<i>SÄT</i>	Säure-Ätz-Technik
<i>REM</i>	Rasterelektronenmikroskop
<i>TEGDMA</i>	Triethylenglycoldimethacrylat
<i>UDMA</i>	Urethandimethacrylat

Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1: Fließdiagramm über die Materialgruppen und Arbeitsschritte dieser Bakterienpenetrationsanalyse
- Abb. 2: Für die Obturation der Wurzelkanäle eingesetzte *Guttapercha Top Color*-Stifte (Coltène Endo)
- Abb. 3: Zweikomponenten-Epoxidharzsealer *AH Plus* mit Basis- und Katalysatorpaste
- Abb. 4: Komponenten des *Syntac Classic* Mehrschritt-Dentin-Bonding-Systems
- Abb. 5: *Tetric Flow* in der *Cavifil*-Applikationsform
- Abb. 6: *Grandio Flow* in der Spritzenapplikationsform
- Abb. 7: *Clearfil Flow* in der Spritzenapplikationsform
- Abb. 8: Komponenten des *Clearfil SE Bond* Dentin-Bonding-Systems
- Abb. 9: Eingebaute Probenzähne im befüllten Zweikammersystem
- Abb. 10: Links ungetrübtes Nährmedium, rechts Trübung nach Bakterienpenetration in der unteren Probenkammer
- Abb. 11: Zeitlicher Ablauf der Laborarbeiten (regelmäßige Wiederholung alle 5 Tage bis zur Terminierung der Studie)
- Abb. 12: Die grafische Darstellung (Boxplot) der ermittelten Penetrationszeiten der vier experimentellen Gruppen zeigt eine längere Resistenz gegen bakterielle Kontamination der unteren Probenkammer nach koronalem Verschluss mittels *Tetric Flow* und *Grandio Flow*.

Tabellenverzeichnis

- Tab. 1: Anforderungen an Spüllösungen
- Tab. 2: Eigenschaften in der Endodontie eingesetzter Spüllösungen
- Tab. 3: Ergebnisse der Mittelwerte und Standardabweichungen der Penetrationszeiten in den vier experimentellen Gruppen
- Tab. 4: Statistik-Werte zur Varianzgleichheit (*Levene-Test*) und Mittelwertgleichheit (*T-Test*) der Penetrationszeiten der verschiedenen Gruppenpaare.

Verwendete Geräte und Materialien

<i>Chloramin-T</i> -Lsg. 5 g/l	Werkstoffkundliches Labor Poliklinik für Zahnerhaltung und Parodontologie der Zahnklinik Erlangen (Direktor: Prof. Dr. A. Petschelt)
rotes Winkelstück	Kaltenbach & Voigt Dental GmbH, Biberach, Deutschland
blaues Winkelstück	Kaltenbach & Voigt Dental GmbH, Biberach, Deutschland
Diamantschleifer 868G016	Hager & Meisinger GmbH, Neuss, Deutschland
Rosenbohrer HM 1S 018	Hager & Meisinger GmbH, Neuss, Deutschland
Kürette	Hu-Friedy Mfg. Co. Inc., Leimen, Deutschland
Scaler	Hu-Friedy Mfg. Co. Inc., Leimen, Deutschland
Heidemann-Spatel	Hu-Friedy Mfg. Co. Inc., Leimen, Deutschland
<i>C-Feilen</i> ISO 06LOT 807310586 ISO 08LOT 810310598 ISO 10LOT 802310547	Dentsply Maillefer, Ballaigues, Schweiz

Guttaperchaspitzen <i>Top Color</i> [®] ISO 55 LOT 151465 ISO 25 LOT 220193	Coltène Endo GmbH & Co. KG, Langenau, Deutschland
Papierspitzen ISO 55 LOT 148791	Coltène Endo GmbH & Co. KG, Langenau, Deutschland
<i>AH Plus</i> [®] Root Canal Sealer LOT 809001286	Dentsply DeTrey GmbH, Konstanz, Deutschland
Spreader Größe A LOT 3954670 Größe B LOT 3723720	Dentsply Maillefer SàRL, Ballaigues, Schweiz
<i>FlexMaster</i> [®] <i>NiTiFlex</i> [®] -Wurzelkanal- aufbereitungsinstrumente	VDW GmbH, München, Deutschland
Natriumhypochlorit (5%)	Apotheke des Klinikums Erlangen, Deutschland
Zitronensäure (40%)	Apotheke des Klinikums Erlangen, Deutschland
Ethanol (70%)	Apotheke des Klinikums Erlangen, Deutschland
Endodontische Spülkanülen "Buquet"	Veddefar N.V., Dilbeek, Belgien
Schaumstoffpellets "Pele Tim" #1	Voco GmbH, Cuxhaven, Deutschland
Polyethylenröhrchen (15ml)	Fa. Sarstedt AG, Nümbrecht, Deutschland

<i>Falcon</i> [®] -Röhrchen (50 ml)	Fa. Becton and Dickinson & Co., Franklin Lakes, New Jersey, USA
Brutschrank <i>FunctionLine</i>	Heraeus GmbH, Hanau, Deutschland
Mikroskop <i>Axio</i> [®] <i>VertZ</i> [®] -Mikroskop	Zeiss AG, Oberkochen, Deutschland
<i>Schaedler</i> -Bouillon (<i>Schaedler</i> Broth) (Rezept laut Anleitung)	Fa. Becton and Dickinson & Co., Franklin Lakes, New Jersey, USA
<i>Syntac</i> [®] <i>Classic</i> <i>Primer</i> [®] LOT L16678 <i>Adhesive</i> [®] LOT L13940 <i>Heliobond</i> [®] LOT L14300	Ivoclar-Vivadent GmbH, Schaan, Lichtenstein
Phosphorsäure <i>Omni-Etch</i> [®] (37%) LOT A0868	Dental Union GmbH, Rodgau, Deutschland
<i>Tetric</i> [®] <i>Flow</i>	Ivoclar-Vivadent GmbH, Schaan, Lichtenstein
<i>Grandio</i> [®] <i>Flow</i>	Voco GmbH, Cuxhaven, Deutschland
<i>Clearfil</i> [®] <i>Flow</i>	Kuraray GmbH, Frankfurt am Main, Deutschland
<i>Clearfil</i> [™] <i>SE Bond</i>	Kuraray GmbH, Frankfurt am Main, Deutschland
Nagellack <i>Colorama</i> [®]	Maybelline Jade GmbH, Düsseldorf, Deutschland

<i>Supradent®</i> -Klebewachs	Oppermann-Schedler GbR, Bonn, Deutschland
<i>Metaflux®</i> Knetharz	Metaflux AG, Möhlín, Schweiz
Polymerisationslampe <i>Polylux® II</i>	Kaltenbach & Voigt Dental GmbH, Biberach, Deutschland
<i>SPSS®</i> 17.0 for <i>Windows</i>	SPSS Inc., Chicago, IL, USA

Die in dieser Arbeit erwähnten Materialien sind eingetragene Markenzeichen der jeweiligen Hersteller und wurden als solche im Text neben der kursiven Darstellung nicht gesondert gekennzeichnet. Die Kennzeichnung erfolgte aus Gründen der Lesbarkeit ausschließlich in dieser Auflistung (Irrtümer vorbehalten).

Verzeichnis der akademischen Lehrer

Prof. Dr. T. Bernatik (Innere Medizin, FAU Erlangen-Nürnberg)
Prof. Dr. H. U. Beuscher (Mikrobiologie, FAU Erlangen-Nürnberg)
Dr. M. Boegershausen (Zahnärztliche Propädeutik, FAU Erlangen-Nürnberg)
Prof. Dr. K. Frank (Physik, FAU Erlangen-Nürnberg)
Prof. Dr. R. Frankenberger (Kinderzahnheilkunde, FAU Erlangen-Nürnberg)
Prof. Dr. J. Gasteiger (Chemie, FAU Erlangen-Nürnberg)
Prof. Dr. J. Göhl (Allgemeine Chirurgie, FAU Erlangen-Nürnberg)
Prof. Dr. W. Haas (Biologie, FAU Erlangen-Nürnberg)
Prof. Dr. E. Hannappel (Biochemie, FAU Erlangen-Nürnberg)
Prof. Dr. A. Hartmann (Pathologie, FAU Erlangen-Nürnberg)
Prof. Dr. U. Hirschfelder (Kieferorthopädie, FAU Erlangen-Nürnberg)
PD Dr. J. Hornung (Hals-, Nasen-, Ohrenkunde, FAU Erlangen-Nürnberg)
Prof. Dr. C. Korbmacher (Physiologie, FAU Erlangen-Nürnberg)
Prof. Dr. E. Lütjen-Drecoll (Anatomie, FAU Erlangen-Nürnberg)
Prof. Dr. W. Neuhuber (Mikroskopische Anatomie, FAU Erlangen-Nürnberg)
Prof. Dr. Dr. F. W. Neukam (MKG-Chirurgie, FAU Erlangen-Nürnberg)
Dr. H. Parsch (Klinische Chemie, FAU Erlangen-Nürnberg)
Prof. Dr. M. Pelka (Parodontologie, FAU Erlangen-Nürnberg)
Prof. Dr. A. Petschelt (Zahnerhaltungskunde, FAU Erlangen-Nürnberg)
Prof. Dr. H. Schell (Dermatologie, FAU Erlangen-Nürnberg)
Prof. Dr. Dr. K. A. Schlegel (Zahnärztliche Chirurgie, FAU Erlangen-Nürnberg)
PD Dr. I. Schneider (Unfallchirurgie, FAU Erlangen-Nürnberg)
Prof. Dr. M. Wichmann (Zahnersatzkunde, FAU Erlangen-Nürnberg)
PD Dr. O. Zolk (Pharmakologie, FAU Erlangen-Nürnberg)

Danksagung

Ich möchte mich ganz herzlich bei Herrn Prof. Dr. Roland Frankenberger, Herrn Dr. Matthias Roggendorf und Herrn Dr. Johannes Ebert für Ihre hilfreiche Unterstützung meiner Arbeit bedanken.

Ganz besonders bedanken möchte ich mich dabei bei Herrn Dr. Matthias Roggendorf, der sowohl die praktischen Durchführungen, als auch die theoretischen Ausführungen meiner Dissertation hervorragend betreut und unterstützt hat.

Ebenso gilt mein Dank Frau Dr. Andrea Wagner sowie den Mitarbeitern des wissenschaftlichen Labors der Zahnklinik Erlangen.